UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Carolina Iovance Golfieri

**Estudo Investigativo da Análise Modal
aplicada a Sistemas de Distribuição
frente às Distorções Harmônicas**

São Carlos

2018

Carolina Iovance Golfieri

**Estudo Investigativo da Análise Modal
aplicada a Sistemas de Distribuição
frente às Distorções Harmônicas**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Mário Oleskovicz

São Carlos

2018

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

I573e Iovance Golfieri, Carolina
Estudo Investigativo da Análise Modal aplicada a
Sistemas de Distribuição frente a Distorções Harmônicas
/ Carolina Iovance Golfieri; orientador Mário
Oleskovicz. São Carlos, 2018.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Qualidade de Energia Elétrica. 2. Sistemas de
Distribuição. 3. Análise Modal. 4. Análise da
Ressonância Harmônica Modal. 5. Decomposição Expectral.
6. Distorção Harmônica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **CAROLINA IOVANCE GOLFIERI**.

Título da dissertação: "Estudo investigativo da análise modal aplicada a sistemas de distribuição frente às distorções harmônicas".

Data da defesa: 25/09/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Mario Oleskovicz**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Fernando Nunes Belchior**
(Universidade Federal de Goiás/UFG)

Aprovada

Prof. Dr. **Carlos Frederico Meschini Almeida**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Agradecimentos

Queria agradecer primeiramente, a Deus, que me deu saúde para manter firme e concluir o meu sonho que foi este mestrado.

A minha mãe, Mária Lucia Iovance Golfieri e meu pai, Julio Cesar Golfieri que nunca mediram esforços para que este sonho fosse possível e muitas vezes abriram mãos dos sonhos próprios para que o meu fosse concretizado.

As minhas irmãs Nátalía Iovance Golfieri e Lorena Iovance Golfieri que sempre estiveram comigo, me apoiaram e me compreenderam.

A minha grande amiga e irmã que a faculdade me deu, Gabriela Yasmin Perreira de Melo, que me deu força e me acompanhou de longe todo este tempo a qual me dediquei ao mestrado. Este foi um sonho a qual sonhamos juntas e hoje posso dizer que conseguimos juntas concluir.

A minha grande amiga e irmã que a vida me deu, Ana Laura Vidal Quadra, que sempre me apoiou e esteve comigo em todos os momentos importantes e difíceis da minha empreitada.

Ao grande amigo que ganhei durante este mestrado, Luiz Henrique Pessoa da Costa Trondoli, que está comigo desde o início e passou diversos momentos ao meu lado e nunca me deixou desistir. Lutou comigo nos momentos difíceis e ficou do lado nos momentos de alegria. Agradeço de coração, pois o seu cuidado comigo me possibilitou chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Assoc. Mário Oleskovicz, que me aceitou como sua orientada, acreditando e confiando no meu empenho para realizar este trabalho, o meu agradecimento de coração.

Aos meus companheiros do LSEE (Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica), os quais me ajudaram muito e se tornaram uma parte da minha família durante a minha

trajetória pelo mestrado.

Ao Fernando Bambozzi Bottura por toda a sua atenção comigo e por todo auxílio ao longo da pesquisa desenvolvida.

Aos companheiros Gabriela Pessoa Campos, Iago de Moura Faria, Thiago Souza Menezes, Paulo Estevão Teixeira Martins e André Luís da Silva Pessoa, por toda a ajuda fornecida durante este período a qual estivemos juntos e por tornar meus dias no laboratório bem mais leves.

Agradeço ainda a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, 2017/09682-8), pelo suporte financeiro concedido para a realização desta pesquisa.

*"Ninguém caminha sem aprender a caminhar,
sem aprender a fazer o caminho caminhando, refazendo e retocando
o sonho pelo qual se pôs a caminhar."
(Paulo Freire)*

Resumo

Golfieri, Carolina **Estudo Investigativo da Análise Modal aplicada a Sistemas de Distribuição frente às Distorções Harmônicas**. 283 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

Esta pesquisa apresenta um estudo investigativo da análise modal aplicada a Sistemas de Distribuição (SDs) frente às distorções harmônicas, no contexto da Qualidade da Energia Elétrica (QEE). A partir do método de análise da ressonância modal, foi conduzido um estudo investigativo para apontar quais barramentos são mais sensíveis e permitem uma melhor observação frente às distorções harmônicas. Vale adiantar que o método de análise de ressonância modal, o qual é fundamentado na decomposição espectral da matriz de admitância do sistema elétrico, já apresenta interessantes trabalhos voltados para sistemas de transmissão. O desafio desta pesquisa foi então investigar a sua aplicação para SDs com um direcionamento às distorções harmônicas, bem como ao seu monitoramento. Dentre os resultados encontrados no desenvolvimento da pesquisa, destaca-se um melhor entendimento do problema das distorções harmônicas, o qual permitiu evidenciar a sensibilidade e a observabilidade dos SDs testes frente ao problema definido no contexto da QEE.

Palavras-chave: Qualidade da Energia Elétrica, Sistema de Distribuição, Análise Modal, Análise de Ressonância Modal, Decomposição Espectral, Distorção Harmônica.

Abstract

Golfieri, Carolina **Investigative Study of Modal Analysis applied to Distribution Systems within the scope of Harmonic Distortions.** 283 p. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2018.

This research presents an investigative study of the modal analysis applied to Distribution Systems (DSs) in the context of Power Quality (PQ) considering the harmonic distortions. From the modal resonance analysis, an investigative study was conducted to indicate which bus bars are more sensitive and allow better observation in face of harmonic distortions. It is worth mentioning that the method of modal resonance analysis, which is based on the spectral decomposition of the admittance matrix of the electric system, already presents interesting applications focused on transmission systems. The challenge of this research was to investigate its application to DSs focusing on harmonic distortions, as well as their monitoring. Among the observed results of the research development, a better understanding of the harmonic distortions problem was achieved, which made it possible to highlight the sensitivity and observability of the DSs tests against the problem defined in the context of the PQ.

Keywords: Power Quality, Distribution System, Modal Analysis, Modal Resonance Analysis, Spectral Decomposition, Harmonic Distortion.

Lista de ilustrações

Figura 1	Principais distúrbios associados à onda de tensão.	53
Figura 2	Decomposição de uma forma de onda qualquer em suas componentes harmônicas.	55
Figura 3	Formas de onda de tensão e corrente a partir de uma carga linear. . . .	56
Figura 4	Formas de onda da tensão e da corrente a partir de uma carga não-linear.	57
Figura 5	A distorção da tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) ocasionada por uma carga não linear.	58
Figura 6	Uma resposta em frequência característica.	74
Figura 7	Diagrama esquemático de um circuito RLC para caracterizar a ressonância série.	75
Figura 8	Curva de resposta da impedância de um circuito RLC série.	76
Figura 9	Diagrama esquemático de um circuito RLC para caracterizar a ressonância em paralelo.	77
Figura 10	Curva de resposta da impedância de um circuito ressonante em paralelo.	78
Figura 11	Metodologia proposta visando à análise dos barramentos de um sistema de distribuição qualquer frente às distorções harmônicas.	93
Figura 12	Sistema de 3 barras.	99
Figura 13	Topologia do sistema de 13 barras concentrado.	101
Figura 14	Modelo do sistema de 13 barras concentrado via o <i>software</i> Interface Gráfica do Alternative Transients Program (ATPDraw).	102
Figura 15	Parâmetros das linhas considerados via o <i>software</i> ATPDraw para o sistema de 13 barras.	103

Figura 16	Topologia do sistema de 13 barras individual.	104
Figura 17	Topologia do sistema de 13 barras industrial.	105
Figura 18	Topologia do sistema do IEEE de 34 barras.	108
Figura 19	As principais etapas para a implementação da Análise Modal da Res- sonância Harmônica (AMRH).	111
Figura 20	Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema de 13 barras concentrado.	119
Figura 21	Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema de 13 barras individual.	119
Figura 22	Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema de 13 barras industrial.	120
Figura 23	Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema do IEEE de 34 barras.	120
Figura 24	Sistema genérico utilizado para exemplificar o processo de obtenção da Matriz de Distorção Harmônica Total (MDHT).	121
Figura 25	Metodologia utilizada para a construção da Matriz de Cobertura para a Distorção Harmônica Total (MCDHT).	122
Figura 26	Metodologia para a obtenção de novos limiares.	124
Figura 27	<i>Cenário 1</i> com apenas um banco de capacitor (B1) na barra 1.	126
Figura 28	<i>Cenário 2</i> com apenas um banco de capacitor (B2) na barra 3.	127
Figura 29	<i>Cenário 3</i> com um banco de capacitor (B1) na barra 1 e o outro (B2) na barra 3.	127
Figura 30	<i>Cenário 4</i> com um banco de capacitor (B1) na barra 2 e o outro (B2) na barra 3.	127
Figura 31	<i>Cenário 5</i> com um banco de capacitor (B1) na barra 1 e o outro (B2) na barra 2.	128
Figura 32	Impedância modal com as suas respectivas frequências de ressonância obtidas para o <i>Cenário 1</i>	129
Figura 33	Impedância modal com as suas respectivas frequências de ressonância obtidas para o <i>Cenário 5</i>	132
Figura 34	Formas dos modos no <i>Cenário 2</i>	133
Figura 35	Formas dos modos no <i>Cenário 4</i>	134

Figura 36	Comparação dos resultados obtidos na análise da frequência de ressonância pela AMRH e pelo método da varredura em frequência.	135
Figura 37	Comparação dos resultados obtidos via o método da varredura em frequência e a AMRH.	135
Figura 38	A MCDHT da fonte harmônica (1) para a frequência de 524 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado utilizando o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	138
Figura 39	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o Fator de Participação (FP) do sistema de 13 barras concentrado.	139
Figura 40	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 300 Hz utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP do sistema de 13 barras concentrado. .	139
Figura 41	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 420 Hz utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP do sistema de 13 barras concentrado. .	140
Figura 42	A MCDHT considerando como fonte harmônica o ASD e utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs do sistema de 13 barras concentrado.	140
Figura 43	A MCDHT considerando como fonte harmônica o conjunto de lâmpadas fluorescentes e utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs do sistema de 13 barras concentrado.	141
Figura 44	A MCDHT para a fonte harmônica definida como outros, utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FP do sistema de 13 barras concentrado.	142
Figura 45	A MCDHT final para todos os limiares das fontes harmônicas consideradas e as médias dos FPs das frequências destas fontes para o sistema de 13 barras concentrado.	143
Figura 46	Comparação entre as frequências de ressonância apresentadas pela AMRH (figura da direita) pelo método da varredura em frequência (figura da esquerda) sobre o sistema de 13 barras individual.	145
Figura 47	A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 601 Hz utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP do sistema de 13 barras individual.	146
Figura 48	A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 4.421 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual. .	147
Figura 49	A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 180 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual. .	148

Figura 50	A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 300 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual. . .	148
Figura 51	A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 420 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual. . .	149
Figura 52	A MCDHT para a fonte harmônica ASD utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.	149
Figura 53	A MCDHT para a fonte harmônica da composição fluorescente utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.	150
Figura 54	A MCDHT para a fonte harmônica de outras cargas utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.	150
Figura 55	A MCDHT final considerando todos os limiares das fontes harmônicas específicas e as médias dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.	151
Figura 56	Comparação gráfica entre a AMRH e o método de varredura em frequência para o sistema de 13 barras industrial.	153
Figura 57	A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 180 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial. . .	155
Figura 58	A MCDHT para a fonte harmônica para a frequência de 300 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.	155
Figura 59	A MCDHT para a fonte harmônica para a frequência de 420 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.	156
Figura 60	A MCDHT para a fonte harmônica (2) utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.	156
Figura 61	A MCDHT final considerando todos os limiares das fontes harmônicas específicas e as médias dos FPs sobre o sistema de 13 barras industrial.	157
Figura 62	Comparação gráfica das frequências de ressonância evidenciadas via a AMRH e o método da varredura em frequência sobre o sistema de 34 barras.	159
Figura 63	Topologia do sistema de 34 barras com a nova numeração das barras. .	160
Figura 64	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz, utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	161
Figura 65	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 300 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	163

Figura 66	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 420 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	163
Figura 67	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 298 Hz, utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	164
Figura 68	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 1.905 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	164
Figura 69	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 4.193 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	165
Figura 70	A MCDHT para fonte harmônica (1) na frequência de 6.501 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.	165
Figura 71	A MCDHT final considerando todos os limiares para as fontes harmônicas específicas e as médias dos FPs sobre o sistema de 34 barras. . .	167
Figura 72	Sistema de 34 barras considerando todos os ramais trifásicos.	168
Figura 73	Varredura em frequência do sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.	169
Figura 74	Método das Potências aplicado ao sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.	170
Figura 75	Método da potência inversa com deslocamento do sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.	170
Figura 76	Função <i>eig</i> do Matlab aplicada ao sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.	171
Figura 77	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	252
Figura 78	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,90.	252
Figura 79	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,80.	253
Figura 80	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,70.	253
Figura 81	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,60.	254

Figura 82	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,50.	254
Figura 83	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	257
Figura 84	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,89.	258
Figura 85	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,70.	258
Figura 86	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,59.	259
Figura 87	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,49.	259
Figura 88	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	262
Figura 89	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,89.	262
Figura 90	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,79.	263
Figura 91	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,70.	263
Figura 92	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,59.	264
Figura 93	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,49.	264
Figura 94	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	267
Figura 95	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,86.	267
Figura 96	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,77.	268
Figura 97	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,67.	268

Figura 98	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,58.	269
Figura 99	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,48.	269
Figura 100	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	272
Figura 101	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,63.	272
Figura 102	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,56.	273
Figura 103	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,49.	273
Figura 104	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,42.	274
Figura 105	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,35.	274
Figura 106	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	277
Figura 107	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,35.	277
Figura 108	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras para os limiares 0,31, 0,27, 0,24 e 0,20.	278
Figura 109	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	280
Figura 110	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,30.	281
Figura 111	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,26.	281
Figura 112	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,23.	282
Figura 113	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,20.	282

Figura 114 MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o
sistema de 34 barras para o limiar 0,17. 283

Lista de tabelas

Tabela 1	Classificação dos distúrbios de tensão de acordo com a sua duração. . .	52
Tabela 2	Principais distúrbios associados à Qualidade da Energia Elétrica (QEE).	53
Tabela 3	Limites das distorções harmônicas totais segundo o PRODIST (em % da tensão fundamental).	59
Tabela 4	Limites das distorções harmônicas totais segundo o IEEE <i>Std</i> 519-2014.	59
Tabela 5	Síntese dos principais pontos correlatos (ou de interesse) entre a revisão bibliográfica realizada nesta subseção e a pesquisa em desenvolvimento.	67
Tabela 6	Os tipos e as principais informações das ressonâncias harmônicas. . . .	78
Tabela 7	Síntese de alguns dos trabalhos consultados e dos métodos direcionados à análises da ressonância harmônica.	90
Tabela 8	Síntese dos sistemas elétricos utilizados para validar a aplicação dos métodos de análises da ressonância harmônica.	91
Tabela 9	Impedância de curto-circuito da fonte trifásica do sistema de 13 barras.	101
Tabela 10	Impedância trifásica dos transformadores do sistema de 13 barras. . . .	102
Tabela 11	Dados de sequência positiva das linhas do sistema de 13 barras já considerando os respectivos comprimentos associados.	103
Tabela 12	Dados das potências trifásicas das cargas e suas respectivas impedâncias para o sistema de 13 barras.	103
Tabela 13	Dados do banco de capacitor alocado no sistema teste de 13 barras concentrado.	104
Tabela 14	Dados trifásico dos bancos de capacitores do sistema de 13 barras individual.	104

Tabela 15	Impedância de curto-circuito da fonte trifásica do sistema de 13 barras industrial.	105
Tabela 16	Impedância trifásica dos transformadores do sistema de 13 barras industrial.	106
Tabela 17	Dados de sequências positiva das linhas do sistema de 13 barras industrial.	106
Tabela 18	Dados das potências trifásicas das cargas e suas respectivas impedâncias para o sistema de 13 barras industrial.	106
Tabela 19	Dado trifásico do banco de capacitor do sistema de 13 barras industrial.	107
Tabela 20	Impedância de curto-circuito da fonte trifásica do sistema do IEEE de 34 barras.	108
Tabela 21	Impedância trifásica dos transformadores do sistema do IEEE de 34 barras.	109
Tabela 22	Dados das potências trifásicas das cargas do sistema do IEEE de 34 barras.	109
Tabela 23	Dados de sequência positiva das linhas do sistema do IEEE de 34 barras.	109
Tabela 24	Dado trifásico do banco de capacitor do sistema do IEEE de 34 barras.	110
Tabela 25	Fonte harmônica representando um controlador de velocidade variável instalado no sistema de 13 barras.	116
Tabela 26	Fonte harmônica de um conjunto de lâmpadas fluorescentes instaladas no sistema de 13 barras.	116
Tabela 27	Fonte harmônica da composição de cargas residenciais instaladas no sistema de 13 barras.	117
Tabela 28	Fonte harmônica do sistema de 13 barras industrial.	117
Tabela 29	Fonte harmônica teste	117
Tabela 30	Dados obtidos na simulação realizada para o <i>Cenário 1</i>	129
Tabela 31	Dados obtidos na simulação realizada para o <i>Cenário 2</i>	130
Tabela 32	Dados obtidos na simulação realizada para o <i>Cenário 3</i>	130
Tabela 33	Dados obtidos na simulação realizada para o <i>Cenário 4</i>	131
Tabela 34	Dados obtidos na simulação realizada para o <i>Cenário 5</i>	132
Tabela 35	Valores da MDHT normalizados para o sistema de 13 barras concentrado quando aplicada a fonte harmônica (1) com frequência de 524 Hz.	136

Tabela 36	Valores do $\sigma_{m\acute{a}x}$ para todas as frequências analisadas no sistema de 13 barras concentrado.	137
Tabela 37	A MCDHT resultante da fonte harmônica (1) com frequência de 524 Hz (frequência de ressonância deste sistema) para o sistema de 13 barras concentrado utilizando o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	137
Tabela 38	A MCDHT final considerando todos os limiares das fontes harmônicas sobre o sistema de 13 barras concentrado.	142
Tabela 39	Limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para todas as frequências analisadas sobre o sistema de 13 barras individual.	145
Tabela 40	A MCDHT final considerando todos os limiares (descritos no Apêndice B) das fontes harmônicas específicas do sistema de 13 barras individual.	152
Tabela 41	Limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para o sistema de 13 barras industrial.	153
Tabela 42	A MCDHT final considerando todos os limiares (descritos no Apêndice C) das fontes harmônicas específicas sobre o sistema de 13 barras industrial.	157
Tabela 43	Limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para o sistema de 34 barras.	160
Tabela 44	A MCDHT final considerando todos os limiares (descritos no Apêndice D) sobre o sistema de 34 barras.	167
Tabela 45	FPs para a frequência de 180 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.	189
Tabela 46	A MDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	189
Tabela 47	A distorção harmônica total da tensão e os novos limiares obtidos para a frequência de 180 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.	190
Tabela 48	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,85, 0,75 e 0,66.	190
Tabela 49	A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiares de 0,57 e 0,47.	190
Tabela 50	FPs na frequência de 300 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.	191
Tabela 51	MDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 300 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.	191
Tabela 52	A distorção harmônica total da tensão e os novos limiares obtidos para a frequência de 300 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.	191

Tabela 53	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	192
Tabela 54	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,87, 0,77 e 0,67.	192
Tabela 55	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,58.	192
Tabela 56	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,48.	192
Tabela 57	FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado. .	193
Tabela 58	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	193
Tabela 59	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 420 Hz do sistema de 13 barras concentrado.	193
Tabela 60	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	194
Tabela 61	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,89.	194
Tabela 62	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,79 e 0,69.	194
Tabela 63	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,59 e 0,49.	194
Tabela 64	FP da frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado. .	195
Tabela 65	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	195
Tabela 66	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 524 Hz do sistema de 13 barras concentrado.	195
Tabela 67	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	196
Tabela 68	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,89.	196
Tabela 69	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,79.	196

Tabela 70	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,69 e 0,59.	196
Tabela 71	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,49.	197
Tabela 72	FP da frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado. .	197
Tabela 73	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	197
Tabela 74	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 540 Hz do sistema de 13 barras concentrado.	198
Tabela 75	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	198
Tabela 76	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,88.	198
Tabela 77	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,79.	198
Tabela 78	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,69.	199
Tabela 79	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,59.	199
Tabela 80	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,49.	199
Tabela 81	FP da frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado. .	200
Tabela 82	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	200
Tabela 83	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 660 Hz do sistema de 13 barras concentrado.	200
Tabela 84	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	201
Tabela 85	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,78 e 0,70.	201
Tabela 86	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,61.	201

Tabela 87	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,52 e 0,44.	201
Tabela 88	FP da frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado. .	202
Tabela 89	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	202
Tabela 90	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 780 Hz do sistema de 13 barras concentrado.	202
Tabela 91	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,31.	203
Tabela 92	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,28.	203
Tabela 93	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,24, 0,21, 0,17.	203
Tabela 94	FP da frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras concentrado. .	204
Tabela 95	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.	204
Tabela 96	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras concentrado.	204
Tabela 97	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	205
Tabela 98	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,20.	205
Tabela 99	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,18, 0,16, 0,13 e 0,11. . .	205
Tabela 100	Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras concentrado.	206
Tabela 101	MDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado.	206
Tabela 102	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica ASD do sistema de 13 barras concentrado.	206
Tabela 103	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	207
Tabela 104	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,83, 0,74 e 0,65.	207

Tabela 105	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,56 e 0,46.	207
Tabela 106	Média dos FPs da fonte outros para o sistema de 13 barras concentrado.	208
Tabela 107	MDHT da fonte outros para o sistema de 13 barras concentrado. . . .	208
Tabela 108	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica outros do sistema de 13 barras concentrado.	208
Tabela 109	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	209
Tabela 110	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,87, 0,78 e 0,68.	209
Tabela 111	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,58.	209
Tabela 112	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,48.	209
Tabela 113	Média dos FPs da fonte fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado.	210
Tabela 114	MDHT da fonte florescente para o sistema de 13 barras concentrado. .	210
Tabela 115	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica fluorescente do sistema de 13 barras concentrado. . . .	210
Tabela 116	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	211
Tabela 117	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,84, 0,75 e 0,65.	211
Tabela 118	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,56.	211
Tabela 119	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,46.	211
Tabela 120	FP da frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	213
Tabela 121	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual.	213
Tabela 122	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras individual.	214

Tabela 123	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	214
Tabela 124	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,84 e 0,75.	214
Tabela 125	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,65.	214
Tabela 126	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,56 e 0,47.	215
Tabela 127	FP da frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	215
Tabela 128	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual.	215
Tabela 129	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 300 Hz do sistema de 13 barras individual.	216
Tabela 130	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	216
Tabela 131	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,86, 0,76 e 0,67.	216
Tabela 132	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,57.	216
Tabela 133	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.	217
Tabela 134	FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	217
Tabela 135	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual.	217
Tabela 136	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 420 Hz do sistema de 13 barras individual.	218
Tabela 137	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	218
Tabela 138	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,87, 0,77 e 0,68.	218
Tabela 139	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,58.	218

Tabela 140	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.	219
Tabela 141	FP da frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	219
Tabela 142	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual.	219
Tabela 143	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 540 Hz do sistema de 13 barras individual.	220
Tabela 144	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	220
Tabela 145	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,89 e 0,79.	220
Tabela 146	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,69.	220
Tabela 147	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,59 e 0,49.	221
Tabela 148	FP da frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	221
Tabela 149	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual.	221
Tabela 150	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 601 Hz do sistema de 13 barras individual.	222
Tabela 151	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	222
Tabela 152	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,89 e 0,79.	222
Tabela 153	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,69.	222
Tabela 154	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,59 e 0,50.	223
Tabela 155	FP da frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	223
Tabela 156	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual.	223
Tabela 157	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 660 Hz do sistema de 13 barras individual.	224

Tabela 158	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	224
Tabela 159	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,89.	224
Tabela 160	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,79.	224
Tabela 161	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,69.	225
Tabela 162	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,59 e 0,50.	225
Tabela 163	FP da frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	225
Tabela 164	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual.	226
Tabela 165	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 780 Hz do sistema de 13 barras individual.	226
Tabela 166	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,89.	226
Tabela 167	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,77.	227
Tabela 168	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,67.	227
Tabela 169	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,58.	227
Tabela 170	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.	227
Tabela 171	FP da frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual. . .	228
Tabela 172	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual.	228
Tabela 173	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 900 Hz do sistema de 13 barras individual.	228
Tabela 174	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	229

Tabela 175	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,64	229
Tabela 176	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,57, 0,50 e 0,43.	229
Tabela 177	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,36	229
Tabela 178	FP da frequência de 1000 Hz para o sistema de 13 barras individual. .	230
Tabela 179	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1000 Hz para o sistema de 13 barras individual.	230
Tabela 180	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 1000 Hz do sistema de 13 barras individual.	230
Tabela 181	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,14, 0,13, 0,11, 0,09 e 0,08.	231
Tabela 182	FP da frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual. .	231
Tabela 183	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual.	231
Tabela 184	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 2000 Hz do sistema de 13 barras individual.	232
Tabela 185	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,68.	232
Tabela 186	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,60, 0,53, 0,45 e 0,38. .	232
Tabela 187	FP da frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual. .	233
Tabela 188	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual.	233
Tabela 189	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 3000 Hz do sistema de 13 barras individual.	233
Tabela 190	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,75.	234
Tabela 191	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,67, 0,59, 0,50 e 0,42. .	234
Tabela 192	FP da frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual. .	234

Tabela 193	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual.	235
Tabela 194	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 4421 Hz do sistema de 13 barras individual.	235
Tabela 195	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,45, 0,40 e 0,35	235
Tabela 196	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,30.	236
Tabela 197	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,25.	236
Tabela 198	Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual. .	236
Tabela 199	MDHT da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual.	237
Tabela 200	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte ASD do sistema de 13 barras individual.	237
Tabela 201	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	237
Tabela 202	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,84 e 0,74.	237
Tabela 203	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,65.	238
Tabela 204	MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,56 e 0,47.	238
Tabela 205	Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual. .	238
Tabela 206	MDHT da fonte outros para o sistema de 13 barras individual.	239
Tabela 207	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte outros do sistema de 13 barras individual.	239
Tabela 208	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	239
Tabela 209	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,86, 0,76 e 0,67.	239
Tabela 210	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,57.	240

Tabela 211	MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.	240
Tabela 212	Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual. .	240
Tabela 213	MDHT da fonte fluorescente para o sistema de 13 barras individual. . .	241
Tabela 214	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte fluorescente do sistema de 13 barras individual.	241
Tabela 215	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$	241
Tabela 216	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,84, 0,74 e 0,65.	241
Tabela 217	MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,56 e 0,47.	242
Tabela 218	FP da frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras industrial. . .	243
Tabela 219	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras industrial.	243
Tabela 220	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras industrial.	244
Tabela 221	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras industrial para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,02, 0,02, 0,02, 0,01 e 0,01.	244
Tabela 222	FP da frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras industrial . . .	244
Tabela 223	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras industrial.	245
Tabela 224	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 300 Hz do sistema de 13 barras industrial.	245
Tabela 225	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras industrial para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,87, 0,77, 0,68, 0,58 e 0,48.	245
Tabela 226	FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras industrial. . .	246
Tabela 227	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras industrial.	246

Tabela 228	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras industrial.	246
Tabela 229	MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras industrial para os limiares 0,80, 0,71, 0,62, 0,53 e 0,45. .	247
Tabela 230	Média dos FPs da fonte harmônica (2) para o sistema de 13 barras industrial.	247
Tabela 231	MDHT da fonte harmônica (2) para o sistema de 13 barras industrial.	247
Tabela 232	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica (2) do sistema de 13 barras industrial.	248
Tabela 233	MCDHT da fonte harmônica (2) para o sistema de 13 barras industrial para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,81, 0,72, 0,63, 0,54 e 0,45.	248
Tabela 234	Numeração das barras do 34 barras quando se leva em consideração o FP e quando se leva a MCDHT.	249
Tabela 235	FP da frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras.	250
Tabela 236	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras.	251
Tabela 237	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 34 barras.	252
Tabela 238	FP da frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras.	255
Tabela 239	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras.	256
Tabela 240	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 298 Hz do sistema de 34 barras.	257
Tabela 241	FP da frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras.	260
Tabela 242	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras.	261
Tabela 243	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 300 Hz do sistema de 34 barras.	262
Tabela 244	FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras.	265
Tabela 245	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras.	266

Tabela 246	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 420 Hz do sistema de 34 barras.	267
Tabela 247	FP da frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras.	270
Tabela 248	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras.	271
Tabela 249	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 1905 Hz do sistema de 34 barras.	272
Tabela 250	FP da frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras.	275
Tabela 251	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras.	276
Tabela 252	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 4.193 Hz do sistema de 34 barras.	277
Tabela 253	FP da frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras.	278
Tabela 254	MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras.	279
Tabela 255	Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 6.501 do sistema de 34 barras.	280

Lista de siglas

AG Algoritmo Genético

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

AMRH Análise Modal da Ressonância Harmônica

ATP Alternative Transients Program

ATPDraw Interface Gráfica do Alternative Transients Program

DHT Distorção Harmônica Total

DHTT Distorção Harmônica Total da Tensão

DHI Distorção Harmônica Individual

FP Fator de Participação

GPS Global Positioning System

HVDC High Voltage Direct Current - Corrente Contínua em Alta Tensão

MCDHT Matriz de Cobertura para a Distorção Harmônica Total

MDHT Matriz de Distorção Harmônica Total

PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PMU Phasor Measurement Unit - Unidades de Medição Fasorial

PSO Particle Swarm Optimization

PAC Ponto de Acoplamento Comum

QEE Qualidade da Energia Elétrica

REIs Redes Elétricas Inteligentes

RNAs Redes Neurais Artificiais

SEP Sistema Elétrico de Potência

SD Sistema de Distribuição

TDF Transformada Discreta de Fourier

TF Transformada de Fourier

TW Transformada Wavelet

TRF Transformada Rápida de Fourier

TWD Transformada Wavelet Discreta

WLS Weighted Least Square

VTCDs Variações de Tensão de Curta Duração

Sumário

1	Introdução	47
1.1	Objetivo da Pesquisa	48
1.2	Organização do Documento	49
2	Distorção Harmônica	51
2.1	A Qualidade da Energia Elétrica e a Distorção Harmônica	51
2.1.1	Distúrbios Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica	51
2.2	A Distorção Harmônica	54
2.2.1	Cargas Lineares e Cargas Não Lineares	55
2.2.2	O Fluxo de Corrente Harmônica	57
2.2.3	Indicadores para a Distorção Harmônica	58
2.2.4	Técnicas Empregadas para a Análise das Distorções Harmônicas .	60
2.2.5	Uma Breve Revisão dos Trabalhos Técnico-Científicos Correlatos .	63
2.2.6	Alocação de Medidores Sensíveis à Distorção Harmônica	67
2.3	Considerações Finais	71
3	Ressonância Harmônica	73
3.1	A Condição de Ressonância	74
3.1.1	Ressonância em Série	75
3.1.2	Ressonância em Paralelo	76
3.2	Métodos para a Identificação da Condição de Ressonância	78
3.2.1	Varredura em Frequência	79
3.2.2	Análise Modal da Ressonância Harmônica	80

3.3	Trabalhos Correlatos	86
3.3.1	Abordagens Gerais	86
3.3.2	Direcionadas à AMRH	88
3.4	Considerações Finais	91
4	Metodologia de Pesquisa	93
4.1	Modelagem dos Sistemas Testes	95
4.1.1	Modelo das Linhas	96
4.1.2	Modelo das Cargas	97
4.1.3	Sistemas Testes	98
4.2	Identificação dos Barramentos mais Sensíveis	110
4.2.1	Matriz de Admitância Nodal	111
4.2.2	Método das Potências	112
4.3	Instalação das Fontes Harmônicas	115
4.3.1	Fontes Harmônicas	115
4.3.2	Alocação da Fonte Harmônica via o <i>Software</i> Alternative Transients Program (ATP)	117
4.4	Construção da MDHT e MCDHT	120
4.5	Considerações Finais	124
5	Resultados	125
5.1	Sistema de 3 Barras	125
5.1.1	Cenários Utilizados sobre o Sistema Teste de 3 Barras	125
5.1.2	Análise dos Resultados Iniciais	128
5.2	Sistema de 13 Barras Concentrado	133
5.2.1	Resultados da AMRH	134
5.2.2	Formação e Análise das MCDHTs	136
5.3	Sistema de 13 barras Individual	144
5.3.1	Resultados da AMRH	144
5.3.2	Formação e Análise das MCDHTs	145
5.4	Sistema de 13 Barras Industrial	152
5.4.1	Resultados da AMRH	152
5.4.2	Formação e Análise da MCDHTs	153

5.5	Sistema de 34 barras	157
5.5.1	Resultados da AMRH	158
5.5.2	Formação e Análise da MCDHT	158
5.5.3	Problemas Encontrados na Análise do Sistema de 34 Barras	168
6	Considerações Finais	173
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	175
	Referências	177
	Apêndices	187
	APÊNDICE A Sistema de 13 Barras Concentrado	189
A.1	Frequência de 180 Hz	189
A.1.1	FP	189
A.1.2	MDHT	189
A.1.3	MCDHT	190
A.2	Frequência de 300 Hz	191
A.2.1	FP	191
A.2.2	MDHT	191
A.2.3	MCDHT	191
A.3	Frequência de 420 Hz	193
A.3.1	FP	193
A.3.2	MDHT	193
A.3.3	MCDHT	193
A.4	Frequência de 524 Hz	195
A.4.1	FP	195
A.4.2	MDHT	195
A.4.3	MCDHT	195
A.5	Frequência de 540 Hz	197
A.5.1	FP	197
A.5.2	MDHT	197
A.5.3	MCDHT	198
A.6	Frequência de 660 Hz	200

A.6.1	FP	200
A.6.2	MDHT	200
A.6.3	MCDHT	200
A.7	Frequência de 780 Hz	202
A.7.1	FP	202
A.7.2	MDHT	202
A.7.3	MCDHT	202
A.8	Frequência de 900 Hz	204
A.8.1	FP	204
A.8.2	MDHT	204
A.8.3	MCDHT	204
A.9	ASD	206
A.9.1	FP	206
A.9.2	MDHT	206
A.9.3	MCDHT	206
A.10	Outros	208
A.10.1	FP	208
A.10.2	MDHT	208
A.10.3	MCDHT	208
A.11	Fluorescente	210
A.11.1	FP	210
A.11.2	MDHT	210
A.11.3	MCDHT	210

APÊNDICE B Sistema de 13 Barras Individual 213

B.1	Frequência de 180 Hz	213
B.1.1	FP	213
B.1.2	MDHT	213
B.1.3	MCDHT	214
B.2	Frequência de 300 Hz	215
B.2.1	FP	215
B.2.2	MDHT	215
B.2.3	MCDHT	216

B.3	Frequência de 420 Hz	217
B.3.1	FP	217
B.3.2	MDHT	217
B.3.3	MCDHT	218
B.4	Frequência de 540 Hz	219
B.4.1	FP	219
B.4.2	MDHT	219
B.4.3	MCDHT	220
B.5	Frequência de 601 Hz	221
B.5.1	FP	221
B.5.2	MDHT	221
B.5.3	MCDHT	222
B.6	Frequência de 660 Hz	223
B.6.1	FP	223
B.6.2	MDHT	223
B.6.3	MCDHT	224
B.7	Frequência de 780 Hz	225
B.7.1	FP	225
B.7.2	MDHT	226
B.7.3	MCDHT	226
B.8	Frequência de 900 Hz	228
B.8.1	FP	228
B.8.2	MDHT	228
B.8.3	MCDHT	228
B.9	Frequência de 1000 Hz	230
B.9.1	FP	230
B.9.2	MDHT	230
B.9.3	MCDHT	230
B.10	Frequência de 2000 Hz	231
B.10.1	FP	231
B.10.2	MDHT	231
B.10.3	MCDHT	232
B.11	Frequência de 3000 Hz	233

B.11.1	FP	233
B.11.2	MDHT	233
B.11.3	MCDHT	233
B.12	Frequência de 4421 Hz	234
B.12.1	FP	234
B.12.2	MDHT	235
B.12.3	MCDHT	235
B.13	ASD	236
B.13.1	FP	236
B.13.2	MDHT	237
B.13.3	MCDHT	237
B.14	Outros	238
B.14.1	FP	238
B.14.2	MDHT	239
B.14.3	MCDHT	239
B.15	Fluorescente	240
B.15.1	FP	240
B.15.2	MDHT	241
B.15.3	MCDHT	241

APÊNDICE C Sistema de 13 Barras Industrial 243

C.1	Frequência de 180 Hz	243
C.1.1	FP	243
C.1.2	MDHT	243
C.1.3	MCDHT	244
C.2	Frequência de 300 Hz	244
C.2.1	FP	244
C.2.2	MDHT	245
C.2.3	MCDHT	245
C.3	Frequência de 420 Hz	246
C.3.1	FP	246
C.3.2	MDHT	246
C.3.3	MCDHT	246

C.4	Fonte Harmônica 2	247
C.4.1	FP	247
C.4.2	MDHT	247
C.4.3	MCDHT	248

APÊNDICE D Sistema de 34 Barras 249

D.1	Frequência de 180 Hz	250
D.1.1	FP	250
D.1.2	MDHT	250
D.1.3	MCDHT	252
D.2	Frequência de 298 Hz	255
D.2.1	FP	255
D.2.2	MDHT	255
D.2.3	MCDHT	257
D.3	Frequência de 300 Hz	260
D.3.1	FP	260
D.3.2	MDHT	260
D.3.3	MCDHT	262
D.4	Frequência de 420 Hz	265
D.4.1	FP	265
D.4.2	MDHT	265
D.4.3	MCDHT	267
D.5	Frequência de 1.905 Hz	270
D.5.1	FP	270
D.5.2	MDHT	270
D.5.3	MCDHT	272
D.6	Frequência de 4.193 Hz	275
D.6.1	FP	275
D.6.2	MDHT	275
D.6.3	MCDHT	277
D.7	Frequência de 6.501 Hz	278
D.7.1	FP	278
D.7.2	MDHT	278

D.7.3	MCDHT	280
-------	-----------------	-----

Introdução

A QEE é caracterizada pela disponibilidade da energia com referência à tensão na forma de uma onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência (DUGAN et al., 2012). Contudo, da prática, sabe-se que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) está sujeito a diversos eventos que podem comprometer a QEE e ocasionar a operação inadequada de equipamentos, redução da vida útil e a parada de linhas de produção, principalmente no setor industrial.

Conforme especificado no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2018), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Distorção Harmônica Total da Tensão (DHTT), causada pela presença de cargas não lineares, ou perturbadoras, que eventualmente podem excitar modos de ressonância em locais específicos dos sistema de distribuição (CUI; WANG, 2012; HUANG; CUI; XU, 2007; XU et al., 2005), deve ser motivo constante de medição e de análise procurando atender as margens de tolerâncias estabelecidas. Contudo, apesar da DHTT ser contemplada por alguns aspectos conceituais e limitantes no PRODIST (ANEEL, 2018), as concessionárias do setor de energia ainda esperam por parte da ANEEL, para um futuro próximo, de diretrizes em relação às análises, medições e campanhas de monitoramento sobre o sistema de distribuição para melhor caracterizar o problema no contexto nacional.

Neste cenário, a definição de métodos e procedimentos para uma melhor análise das distorções harmônicas pode ser de extrema utilidade para assegurar ou orientar ações para a melhoria dos níveis de QEE nos Sistemas de Distribuição (SDs). Sendo assim, adianta-se que a pesquisa desenvolvida possui como enfoque principal um estudo investigativo, com a consequente análise e aprimoramento de um método para subsidiar a avaliação de SDs, com foco nas distorções harmônicas.

Desta maneira, a partir das análises, campanhas de medição e de monitoramento sobre os SDs, será de interesse por parte da ANEEL, concessionárias e demais agentes do setor elétrico, bem como dos consumidores finais, que sejam avaliadas as causas, bem como a extensão (penetração) dos danos provocados por estes desvios nos parâmetros nominais da tensão, estabelecendo-se diretrizes para a elaboração de índices e de estratégias mitigadoras aplicáveis ao distúrbio de QEE mencionado.

No contexto mundial, também se observa a tendência crescente de uma exigência mais rígida em termos da QEE fornecida, seja por parte dos consumidores finais, ou das concessionárias de energia elétrica. Consumidores de todos os setores econômicos dependentes da energia elétrica estão cada vez mais conscientes de que possuem o direito de serem supridos por uma energia elétrica de qualidade certificada, uma vez que se observa o surgimento e a consolidação de normatizações (no contexto nacional e internacional) que visam assegurar a qualidade da energia contratada. Além disso, a pressão tecnológica advinda da aplicação dos conceitos das *Smart Grids* (Redes Elétricas Inteligentes (REIs)) também reforça a tendência necessária do maior monitoramento e análise da QEE nos SDs.

1.1 Objetivo da Pesquisa

O objetivo principal da pesquisa é apresentar um estudo investigativo da análise modal aplicada a SDs frente às distorções harmônicas, no contexto da QEE. Dentre os resultados esperados pela execução do projeto destaca-se um melhor entendimento e caracterização do problema das distorções harmônicas nos SDs. Para tanto, pretende-se evidenciar a sensibilidade dos SDs perante a presença de componentes harmônicas e também a observabilidade das distorções harmônicas em sistemas testes.

Pelo estudo investigativo, objetiva-se obter um indicativo acerca do mapeamento da propagação e/ou penetração das distorções harmônicas em SDs testes. Ou seja, pretende-se apresentar uma metodologia para o processamento das informações que sejam relevantes e inerentes à sensibilidade e observabilidade dos SDs monitorados no que diz respeito às distorções harmônicas da tensão. Neste contexto, propõe-se a obtenção de uma matriz de observabilidade do sistema, direcionada às distorções harmônicas, sendo possível assim fornecer a métrica necessária, por exemplo, para uma futura decisão da alocação dos monitores de QEE frente às distorções harmônicas.

1.2 Organização do Documento

Este documento está organizado em seis capítulos. A partir deste, o segundo capítulo tratará dos conceitos básicos sobre as distorções harmônicas, desde os estudos envolvendo este evento no contexto da qualidade da energia elétrica até uma revisão bibliográfica apurada sobre a instalação de medidores de qualidade da energia sensíveis às distorções harmônicas. Este enfoque dado nesta parte da revisão bibliográfica permitirá melhor justificar a importância do estudo desenvolvido ao longo deste trabalho inferindo a uma futura aplicação dos resultados encontrados.

No terceiro capítulo serão apresentados breves conceitos e as metodologias comumente observadas na literatura para o estudo da ressonância harmônica. Contudo, o foco deste capítulo será o de abordar a metodologia utilizada neste trabalho, a análise modal da ressonância harmônica, além de apresentar uma revisão bibliográfica sobre como a mesma vem ganhando espaço no estudo da ressonância harmônica.

No quarto capítulo será apresentada a metodologia desenvolvida ao longo deste estudo investigativo, seguindo dos resultados obtidos da aplicação da mesma nos sistemas testes propostos no capítulo cinco.

O sexto capítulo se restringirá as conclusões, sugestões de trabalhos futuros e publicações realizadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, seguem as referências bibliográficas e os apêndices associados.

A Distorção Harmônica

2.1 A Qualidade da Energia Elétrica e a Distorção Harmônica

Em um SEP, idealmente, os sinais de tensão e corrente devem ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibrados entre as fases e com amplitude e frequência constantes em qualquer ponto de medição do sistema. Por estes motivos, qualquer desvio, acima de certos limites, nas características destes parâmetros são considerados como um problema de QEE (BRONZEADO et al., 1997; FORTES, 2016). Pela definição apresentada, garante-se a habilidade do SEP de alimentar cargas sem danificá-las ou reduzir sua vida útil. Assim, pode-se afirmar que os conceitos associados à QEE envolvem não somente o fornecimento da energia pela concessionária, mas também a perfeita operação dos equipamentos presentes nas instalações dos consumidores finais (FORTES, 2016).

2.1.1 Distúrbios Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica

Quando ocorre um problema de QEE, este reflete-se por um desvio na forma de onda ou na intensidade da tensão de alimentação. Sendo assim, a QEE, geralmente, pode ser representada pela qualidade da tensão elétrica observada no ponto onde a carga está conectada. Uma vez, que já existem normas que especificam as faixas operacionais para a tensão de alimentação, mensurar a qualidade do fornecimento de energia, a princípio, torna-se uma tarefa menos complexa (BRONZEADO et al., 1997).

De uma maneira em geral, os distúrbios estão relacionados com diferentes eventos que ocorrem nos SEPs. Estes, podem ser gerados através de operações normais, como, por

exemplo, do chaveamento de banco de capacitores, da entrada e saída de grandes blocos de cargas lineares ou não, enquanto outros estão relacionados com eventos não operacionais, como das descargas atmosféricas e das situações de curtos-circuitos (faltas) na rede elétrica (FORTES, 2016). Para se ter uma visão geral dos vários fenômenos eletromagnéticos associados à QEE é conveniente, por exemplo, agrupá-los de acordo com sua duração, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos distúrbios de tensão de acordo com a sua duração.

Fonte: Adaptado de Fortes (2016)

Categoria	Características
Transitório	São fenômenos de curtíssima duração com ocorrência dentro de um semiciclo de período, ou seja, com duração menor que 8,33 ms para 60 Hz.
Temporário	São fenômenos de curta duração com ocorrência entre um semiciclo (8,33 ms) e 1 minuto, de acordo com as normas internacionais, e de 16,66 ms (um ciclo) até 3 minutos pelo PRODIST (ANEEL, 2018).
Permanente	São fenômenos que se manifestam em regime permanente que acompanham a frequência fundamental da rede, compreendendo, por exemplo, os desequilíbrios de tensão, as distorções na forma de onda e as flutuações de tensão.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), em sua recomendação prática, descrita na *IEEE Std. 1159*(IEEE..., 2009), classifica os principais distúrbios eletromagnéticos de acordo com suas características típicas, como apresentados na Tabela 2.

No Brasil, a ANEEL através do PRODIST - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, apresenta os mesmos distúrbios retratados no *IEEE Std.1159*. Porém, alguns autores (FORTES, 2016) apresentam algumas críticas com relação à definição dos parâmetros referentes aos distúrbios de energia elétrica no PRODIST, citando que quando comparados a recomendação prática do *IEEE Std.1159*, observam-se maiores durações dos eventos. Entretanto, isto não tira a importância do PRODIST para o sistema elétrico brasileiro, visto que ainda está em constante revisão.

A Figura 1 sintetiza os principais distúrbios associados à QEE refletidos na forma de onda da tensão de alimentação de um SEP.

Dentre os vários distúrbios que podem comprometer a operação do SEP, a distorção harmônica, conforme exposto por Dugan et al. (2012), apresenta-se como um dos

Tabela 2 – Principais distúrbios associados à QEE.

Fonte: Adaptado de (IEEE..., 2009)

Categorias	
Transitórios	Impulsivos
	Oscilatórios
Variações de Tensão de Curta Duração	Instantânea
	Momentânea
	Temporária
Variações de Tensão de Longa Duração	
Desequilíbrio de Tensão	
Distorção da Forma de Onda	Nível CC
	Harmônicos
	Inter-Harmônicos
	Notching
	Ruído
Flutuação de Tensão	
Variações de Frequência

Figura 1 – Principais distúrbios associados à onda de tensão.

Fonte: Fortes (2016)

principais problemas de QEE, especialmente pelo fato de que os sistemas elétricos são projetados para operar com base na frequência fundamental (PHIPPS; NELSON; SEN, 1994; BONNER et al., 1996). As distorções harmônicas também acabam ganhando posição de destaque uma vez que se caracterizam como fenômenos permanentes na rede, ao contrário dos demais que podem ocorrer de forma esporádica (FORTES, 2016).

2.2 A Distorção Harmônica

As componentes harmônicas podem ser representadas pela sobreposição de ondas senoidais puras, na qual a frequência de cada senoide é um múltiplo inteiro ¹ da frequência fundamental (DUGAN et al., 2012). O número de vezes que esta frequência é múltipla inteira da frequência fundamental, denomina-se: ordem harmônica (FORTES, 2016).

A soma das ondas senoidais, está relacionada a série de Fourier (DUGAN et al., 2012), desenvolvida em 1822 pelo Barão Jean Fourier (BOYLESTAD, 2012). Nesta teoria, qualquer forma de onda periódica não senoidal, de frequência f_0 , pode ser decomposta pela soma de uma componente contínua do sinal em uma série de infinitos termos senoidais, cujas frequências destes termos são múltiplas de f_0 . O termo senoidal de frequência f_0 é chamado de frequência fundamental e os termos de frequências múltiplas da fundamental, são denominadas por frequências harmônicas (BOYLESTAD, 2012; FORTES, 2016).

Dessa forma, dada uma função periódica f_t , a mesma pode ser decomposta como apresentado:

$$f_t = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [(A_n \cos(n * \omega t)) + (B_n \sin(n * \omega t))] \quad (1)$$

Onde: A_0 é a componente contínua, A_n e B_n são as componentes de enésima ordem, ωt é o deslocamento angular dado por $2\pi f_0 t$ (rad).

Devido às propriedades citadas, a série de Fourier e suas derivações são universalmente aplicadas na análise de problemas envolvendo distorções harmônicas (DUGAN et al., 2012). Para tais aplicações, relembra-se que as distorções harmônicas são fenômenos permanentes e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, os quais duram apenas alguns ciclos (FORTES, 2016).

Para ilustrar a composição de um sinal qualquer, tem-se a Figura 2, onde a forma de onda original do sinal está representada na cor roxa, e, nas demais cores, a sua decomposição em três outras formas de onda senoidais. A onda senoidal na cor azul é oriunda da frequência fundamental. Como o ciclo das demais ondas decompostas se repetem para 3 e 5 vezes no período de tempo em que a onda na frequência fundamental ocorre, observam-se as componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens, respectivamente (FORTES, 2016).

¹Existem também componentes harmônicas cujas frequências não são múltiplas inteiras da frequência fundamental, denominadas de inter-harmônicas.

Figura 2 – Decomposição de uma forma de onda qualquer em suas componentes harmônicas.

Fonte: Próprio Autor

As características gerais das componentes harmônicas, de acordo com Dugan et al. (2012), é que quando ambos os semiciclos positivo e negativo de uma forma de onda apresentam deformações simétricas, a série de Fourier contém apenas componentes ímpares. Por outro lado, quando a forma de onda apresentar assimetria entre os semiciclos do sinal, esta apresenta componentes harmônicas pares.

2.2.1 Cargas Lineares e Cargas Não Lineares

Como as características não lineares de alguns equipamentos são consideradas como as principais causas da distorção harmônica na rede elétrica, esta seção abordará uma breve contextualização sobre o tema.

As cargas lineares são assim classificadas por apresentarem um fluxo proporcional da corrente e a tensão aplicada, com base em um ciclo da frequência fundamental. Para essa classe de cargas o formato da forma de onda de corrente drenada do sistema acompanha o mesmo formato do sinal da tensão de alimentação, com a mesma frequência, ainda que haja defasamentos angulares entre as formas em função da natureza da carga ser resistiva, indutiva ou capacitiva. Sendo assim, mesmo para uma forma de onda da tensão distorcida, a corrente na carga linear seguirá o mesmo formato evidenciado (FORTES, 2016).

A Figura 3 ilustra as formas de onda de tensão e corrente resultantes quando observadas sobre uma carga com característica linear.

Já nas cargas com perfis não lineares, observa-se a presença de componentes harmônicas nas formas de onda da corrente (KALAIR et al., 2017; BONNER et al., 1996; PHIPPS;

Figura 3 – Formas de onda de tensão e corrente a partir de uma carga linear.

Fonte: Próprio Autor

NELSON; SEN, 1994), mesmo estando a tensão de alimentação livre de tais componentes. Ou seja, a proporcionalidade desejada entre as formas de ondas da tensão e da corrente não é observada devida à impedância da carga variar no decorrer do ciclo em análise (FORTES, 2016).

A Figura 4 ilustra as formas de onda da tensão e da corrente resultantes após a iteração da tensão com uma carga com característica (impedância) não-linear.

Portanto, as cargas não lineares, também referenciadas como cargas especiais ou perturbadoras, geram novas frequências em regime permanente. Ou seja, a corrente drenada pode apresentar frequências que não estão presentes na tensão de alimentação. Estas frequências geradas são sobrepostas à forma de onda na frequência fundamental, alterando a forma do sinal de corrente e resultando em distorções harmônicas na rede elétrica (FORTES, 2016).

São exemplos de cargas não lineares o forno a arco voltaico, motor de corrente contínua com controle de velocidade, motor de indução de média e alta potência, inversor de corrente contínua para corrente alternada, conversor eletrônico estático, conversor eletrônico ativo (transistorizado ou tiristorizado), entre outras (CPFL, 2012).

Figura 4 – Formas de onda da tensão e da corrente a partir de uma carga não-linear.

Fonte: Próprio Autor

2.2.2 O Fluxo de Corrente Harmônica

A não linearidade das cargas tende a causar uma distorção harmônica na corrente e, conseqüentemente, na tensão elétrica, quando da interação da corrente distorcida com a impedância do sistema elétrico. Quando uma carga não linear drena corrente do sistema de geração de energia, o fluxo de corrente passa por toda a impedância do sistema, causando uma queda de tensão proporcional a cada frequência harmônica contida no sinal de corrente (FORTES, 2016).

Outra maneira para descrever o fenômeno é como encontrado na norma *IEEE Std 519-1992* (IEEE, 1992), visto que as correntes harmônicas que fluem das cargas harmônicas (fontes harmônicas) tendem a buscar o caminho cuja a impedância é mais baixa. Como a impedância equivalente da fonte de geração é geralmente muito menor do que os caminhos paralelos oferecidos pelas cargas, este se torna um caminho propício. Contudo, a corrente harmônica irá se dividir dependendo das impedâncias encontradas. Um exemplo típico é que as componentes harmônicas de altas frequências tendem a passar pelos bancos de capacitores, já que nestas condições os mesmos apresentarão uma impedância muito próxima ou igual a zero.

No que segue, toma-se como referência o circuito da Figura 5, na qual a tensão da fonte puramente senoidal alimenta uma carga linear e outra não linear a partir do PAC. Ainda

nesta figura, a impedância Z_s representa a impedância do sistema, com característica linear.

Figura 5 – A distorção da tensão no PAC ocasionada por uma carga não linear.

Fonte: Próprio Autor

Relembra-se que a tensão no PAC também pode estar distorcida devido a interação das correntes harmônicas com a impedância do sistema (Z_S). Ou seja, para cada frequência harmônica presente na corrente distorcida I_2 , drenada pela carga não linear, será produzida uma queda de tensão na impedância do sistema (Z_S) para a mesma frequência que a gerou (DUGAN et al., 2012), resultando em uma distorção na tensão do barramento V_{PAC} , e, conseqüentemente, também provocando distorção na corrente I_1 drenada pela carga linear (FORTES, 2016).

2.2.3 Indicadores para a Distorção Harmônica

Como já relatado nesta seção, a presença de componentes harmônicas (ou simplesmente harmônicas), causam problemas associados à falta de QEE. Desta maneira, é fundamental a regulamentação de normas que assegurem um nível máximo de distorção e, neste sentido, faz-se necessário que sejam utilizados indicadores que quantifiquem e analisem os efeitos das componentes harmônicas sobre o SEP de interesse.

No Brasil, a análise e a presença de componentes harmônicas está sujeita à aplicação de normas/recomendações, como é o caso do conteúdo encontrado no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018).

Além de normas nacionais, vale ressaltar a existência de normas e recomendações internacionais referentes aos níveis máximos de emissão de distorções harmônicas por

parte das cargas não lineares, como por exemplo, a *IEEE Std 519-1992* (IEEE, 1992).

2.2.3.1 A Distorção Harmônica Total

A Distorção Harmônica Total (DHT) pode estar relacionada aos sinais de tensão (DHTT), ou aos de corrente (DHTI).

Com relação à tensão, o PRODIST apresenta a seguinte expressão para quantificar a DHTT:

$$DHT_t\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_f} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

V_h : a amplitude da componente harmônica de tensão de ordem h ;

V_f : a amplitude da componente fundamental de tensão;

h : a ordem da componente harmônica; e

$hm\acute{a}x$: a ordem da maior frequência (componente) harmônica em análise.

Com base em valores de referência para a tensão nominal, a norma também estabelece limites á este indicador, como mostra a Tabela 33.

Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais segundo o PRODIST (em % da tensão fundamental).

Tensão Nominal	DHT_t (%)
$V_n \leq 1,0$ kV	10,00
$1,0$ kV $< V_n < 69$ kV	8,00
69 kV $\leq V_n < 230$ kV	5,00

Já a norma internacional do IEEE *Std 519-2014* restringe bem mais esses valores, como mostra a Tabela 34.

Tabela 4 – Limites das distorções harmônicas totais segundo o IEEE *Std 519-2014*.

Tensão no Ponto de Acoplamento Comum (V_n)	DHT_t (%)
$V_n < 69$ kV	5,00
$69,001$ kV $< V_n < 161$ kV	2,50
$V_n > 161,001$ kV	1,50

2.2.4 Técnicas Empregadas para a Análise das Distorções Harmônicas

Em grande parte dos trabalhos técnico-científicos encontrados, o objetivo do estudo harmônico é quantificar a distorção das formas de onda das tensões e/ou correntes em vários pontos do SEP. Contudo, vale relembrar que entre as modernas cargas não lineares massivamente instaladas sobre o SEP, os dispositivos trifásicos baseados na eletrônica de potência tem uma significativa contribuição na geração de harmônicos durante o processo de chaveamento (FIGUEIREDO, 2006). Neste sentido, torna-se de grande valia prever, por meio de uma ferramenta de análise adequada, a penetração (ou propagação) da distorção harmônica da tensão ou corrente ao longo do sistema de distribuição de interesse (FIGUEIREDO, 2006; WILLIAMS; BROWNFIELD; DUFFUS, 1993).

As modelagens disponíveis na literatura para análise de cargas não lineares de grande porte, podem ser divididas em dois grupos: modelagens no domínio do tempo e no domínio da frequência (FIGUEIREDO, 2006), a saber:

- Domínio do tempo: apresenta uma integração em tempo discretizado. A estabilidade e a precisão das respostas dependem do passo de cálculo adotado. Como os erros são acumulados, passo-a-passo, a solução pode divergir caso um tempo inadequado de cálculo seja escolhido (FIGUEIREDO, 2006).
- Domínio da frequência: é a mais robusta, pois a solução é encontrada para cada frequência, individualmente, e os erros não são acumulativos (FIGUEIREDO, 2006).

A maioria dos estudos relacionados a análise harmônica utiliza-se de aproximações determinísticas, devido às dificuldades de representação dos componentes e cargas do sistema. Porém, quando o modo de operação das cargas é altamente variável, e a análise envolve operações de múltiplos chaveamentos, opta-se pelas aproximações probabilísticas (MORAIS, 2005).

2.2.4.1 Modelagem Domínio do Tempo

A solução no domínio do tempo é baseada em uma integração sobre um intervalo de tempo discreto, e obtida atribuindo-se um conjunto de condições iniciais para os estados do sistema nas equações no domínio do tempo (FIGUEIREDO, 2006; MORAIS, 2005).

Nesta é possível resolver uma gama de equações diferenciais via simulação computacional, que facilitam a construção de um modelo para os cálculos harmônicos. Este pode

evitar aproximações inerentes que ocorrem na solução do domínio da frequência (DAS, 2017).

Da literatura pode-se citar duas técnicas que geralmente utilizam este recurso. Os métodos que usam as variáveis de estado, que são amplamente utilizados para simulações de circuitos eletrônicos (SPICE (FIGUEIREDO, 2006)), e os que aplicam a análise nodal, que são geralmente aplicadas para simulações de transitórios eletromagnéticos em SEPs (EMTP (DAS, 2017)) (MASOUM; FUCHS, 2015).

De acordo com Masoum e Fuchs (2015), existem duas limitações ligadas aos métodos que utilizam o domínio do tempo para estudos dos harmônicos. Estes métodos geralmente exigem um tempo computacional considerável (mesmo para sistemas pequenos) para os cálculos contendo informações harmônicas. Além do mais, os dados obtidos são para o estado permanente do sistema fazendo com que ainda seja necessário a execução da transformada de Fourier para extrair os dados dos componentes harmônicos. Além disso, existem algumas dificuldades com relação a modelagem dos componentes do sistema que apresentam parâmetros dependentes da frequência.

2.2.4.2 Modelagem no Domínio da Frequência

Na sequência, serão comentados *três métodos* encontrados na literatura correlata e que são aplicados ao domínio da frequência na estimação da distorção harmônica, tanto para sinais de tensão como de corrente.

O método que utiliza a matriz de admitância do sistema, é o procedimento de simulação mais utilizado pelas companhias de energia elétrica, assim como, em *softwares* comerciais para a análise harmônica. Uma forte razão pela sua preferência é que estes programas, normalmente, não exigem conhecimentos detalhados sobre partes do sistema em análise (MORAIS, 2005).

No método da matriz de admitância, pode-se efetuar uma varredura em frequência, para a frequência motivo da análise. Pode-se calcular a resposta em frequência de uma rede, do ponto de vista da barra, ou de um nó em particular. Tipicamente, uma tensão (ou corrente) senoidal de 1 p.u. é injetada na barra em análise, e a resposta da tensão (ou corrente) é calculada. Este cálculo é repetido, usando passos discretos de frequência ao longo da faixa de interesse (BONNER et al., 1996; ARRILLAGA; WATSON, 2003). Matematicamente, o processo consiste em resolver a Equação 3 do sistema, na frequência

$n \times f_0$:

$$[I_n] = [Y_n] \cdot [V_n] \quad (3)$$

Sendo:

$[I_n]$: o vetor conhecido da corrente para cada frequência;

$[V_n]$: o vetor da tensão nodal a ser encontrado para cada frequência; e

$[Y_n]$: a matriz de admitância do sistema para cada frequência em estudo.

Caso a fonte harmônica apresente dados complementares disponíveis, a análise de varredura em frequência pode ser expandida para determinar informações adicionais sobre a distorção harmônica (BONNER et al., 1996).

Segundo Bonner et al. (1996), a varredura em frequência é a ferramenta mais adequada para detectar a condição de ressonância harmônica em um SEP. Entretanto, Xu et al. (2005) apresenta as falhas existentes no método e propõem uma nova vertente, a análise modal para a ressonância harmônica, que será posteriormente comentada.

Xu, Marti e Dommel (1991), Sharma, Fleming e Niekamp (1991) apresentam um método de iteração harmônica, onde a carga geradora de harmônica é modelada como uma fonte de corrente dependente da tensão, como representado na Equação 4:

$$I_h = F(V_1, V_2, \dots, V_h, c) \quad (4)$$

Onde:

h representa a ordem harmônica de interesse;

$(V_1, V_2, \dots, V_h)$ são os fasores das tensões harmônicas no sistema; e

c é um grupo de variáveis, tais como os ângulos de disparo e/ou potência de saída.

Para calcular as tensões harmônicas para cada frequência a ser utilizada, utilizam-se os resultados das fontes de correntes I_h obtidos pela Equação 4. No próximo passo, empregam-se as tensões calculadas para definir valores mais precisos para as fontes harmônicas, a partir da Equação 4. Este processo iterativo é repetido até a convergência estipulada seja alcançada (BONNER et al., 1996).

Neste método, a carga geradora de harmônica é modelada como uma fonte de corrente dependente da tensão. Isto acarreta um melhor conhecimento dos equipamentos geradores de harmônicas, do que os baseados na matriz de admitância. Entretanto, esta

técnica apresenta dificuldade, quando exposta á uma situação de ressonância harmônica acentuada. A convergência deste método pode ser melhorada incluindo a matriz de admitância equivalente dos equipamentos não lineares (BONNER et al., 1996), como descrito na Equação 3.

A representação de cargas não lineares como fontes de correntes dependentes da tensão, torna-se importante à medida que as correntes geradas por estas cargas sofrem influência direta da tensão de alimentação (FIGUEIREDO, 2006).

Para ilustrar, Song, Heydt e Grady (1984), consideram a natureza da dependência da tensão das cargas não lineares, empregando na análise, simultaneamente, algoritmos do tipo Newtoniano. Segundo os autores, o método de Newton-Raphson pode ser aplicado ao fluxo de corrente harmônica, baseando-se no balanço de potência ativa, reativa, tensão e corrente, sejam estas na frequência fundamental ou nas frequências harmônicas (DAS, 2017). A solução do sistema é obtida utilizando de forma simultânea as Equações 3 e 4 para a resolução. O mesmo exige que o modelo da carga esteja disponível de tal forma que as derivações possam ser facilmente computadas. Na teoria, a convergência deste método é melhor que a do método de iteração harmônica, se o ponto de início da iteração for próximo do ponto da solução (BONNER et al., 1996).

2.2.5 Uma Breve Revisão dos Trabalhos Técnico-Científicos Correlatos

Pelo que foi apresentado, têm-se os conceitos básicos sobre as distorções harmônicas e como este distúrbio se manifesta nos SEPs. Com relação as técnicas empregadas para a análise e quantificação deste evento permanente é possível compreender que cada um dos dois domínios podem ser aplicados dependendo das situações em estudo.

Neste sentido, também é importante verificar na literatura correlata os indicativos e procedimentos para a medição da distorção harmônica, buscando melhor compreender como os mesmos se aplicam e permitem observar a presença da distorção harmônica.

Das últimas revisões do PRODIST, observam-se alguns indicativos das metodologias que devem ser aplicadas para o planejamento e aferição dos sistemas elétricos das distribuidoras, quase sempre baseados em ações de medições, contínuas ou temporárias, das grandezas elétricas envolvidas.

Os indicadores calculados atualmente e regulamentados no PRODIST são: os de in-

terrupções (DEC - Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora; FEC - Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora; DIC - Duração de interrupção por unidade consumidora; e FIC - Frequência de interrupção por unidade consumidora). Contudo, todos relativos à duração e a frequência das interrupções, por conjunto de consumidores e por consumidor individual, e os níveis de tensão relativos à ocorrência de fornecimento de energia ao consumidor com tensões fora dos padrões de qualidade definidos pela ANEEL, os quais são: DRP - Duração relativa de transgressão de tensão precária; DRC - Duração relativa de transgressão de tensão crítica; e ICC - Índice de unidades consumidoras com tensão crítica. Diante do exposto, surge então a necessidade de um monitoramento permanente, visto que a energia elétrica passou a ser vista como um produto, não só ponto de vista da continuidade do fornecimento, mas também da conformidade (JUNIOR; SILVA; FILHO, 2016).

Diante deste contexto, Phipps, Nelson e Sen (1994) relatam que, naquela época, as agências reguladoras internacionais já começaram a inserir diretrizes mais rigorosas com relação a distorção harmônica no SEP, obrigando as concessionárias a buscar maneiras para medir o fenômeno. Com intuito de contribuir neste âmbito, os autores apresentaram algumas técnicas já existentes na literatura para analisar os componentes harmônicos na forma de onda dos sinais de interesse, como a Transformada Rápida de Fourier (TRF), a Transformada Discreta de Fourier (TDF), a Distorção Harmônica Individual (DHI) e a DHTT. Para concluir a análise, aplicaram estas técnicas em formas de ondas medidas em um sistema de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Já em um cenário mais recente, Watson e Arrillaga (2003) apresentaram uma visão geral das técnicas disponíveis para a análise da distorção harmônica em sistemas de energia de transmissão e distribuição maiores, modernos e mais complexos. Dentre as técnicas, os autores citam: a análise iterativa de harmônicos; a estimação de estado harmônico; técnicas no domínio do tempo; e a análise nodal (baseada na matriz de admitância).

Além das técnicas convencionais encontradas na literatura, como versões da Transformada de Fourier (TF), outras técnicas foram propostas, entre estas a Transformada Wavelet (TW), como citado no trabalho de Ghaemi, Abyaneh e Mazlumi (2011). Baseado na versão discreta da TW, os autores apresentaram uma definição mais flexível para a distorção harmônica. Os mesmos investigaram a melhor maneira de usar a transformada, analisando parâmetros como a frequência de amostragem e as funções *Wavelets* mais adequadas, bem como o melhor intervalo de tempo para analisar o sinal na presença da

distorção harmônica. Para validar o método, os índices observados pela aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TWD) foram comparados com os índices da TRF. Os testes foram realizados considerando um sistema de distribuição real, e a TWD apresentou algumas vantagens com relação a TRF.

Outros procedimentos recorrentes de medição da distorção harmônica, são baseados nas técnicas inteligentes, como, por exemplo, as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Hartana e Richards (1990) apresentaram uma proposta, com o intuito de fazer estimativas iniciais das fontes harmônicas no SEP com cargas não lineares. Estas estimativas iniciais foram utilizadas como pseudo-medidas, para a realização da estimativa do estado harmônico, conseqüentemente, melhorando as medidas obtidas pelas RNAs. Nesta abordagem, é possível verificar que as RNAs treinadas são capazes de produzir estimativas aceitáveis, inclusive para as fontes harmônicas variáveis. O estimador harmônico idealizado tem a função de fazer com que as medidas fiquem bem mais próximas aos valores esperados. A técnica proposta por Hartana e Richards (1990) foi aplicada no sistema teste de transmissão do IEEE de 14 barras.

Na mesma linha, Nascimento et al. (2013) reportaram uma abordagem eficiente para a medição da distorção harmônica utilizando RNAs aplicadas à estimação do conteúdo harmônico das correntes das cargas em sistemas de distribuição monofásicos. Na metodologia é proposta a realização da estimativa das amplitudes e fases dos primeiros cinco componentes harmônicos ímpares, considerando as variações da forma de onda da corrente drenada pelas cargas não lineares, dentro dos limites previamente conhecidos. Diferente da abordagem apresentada por Hartana e Richards (1990), Nascimento et al. (2013) reproduziram o método de maneira *online*, além de descreverem que o método requer baixo esforço computacional e não exige um número específico de amostras por período a uma taxa de amostragem fixa, resultando em um sistema de rastreamento de baixo custo.

Outra forma para realizar a medição das componentes harmônicas no SEP é citada por Meliopoulos et al. (2000). Neste trabalho, os autores propuseram um sistema de medição harmônica via Phasor Measurement Unit - Unidades de Medição Fasorial (PMU). O sistema de medição consiste em Global Positioning System (GPS) digitais, sincronizados para registrar os eventos de forma local, bem como através de um sistema de processamento principal. Outra abordagem relevante utilizando PMUs, é de Melo et al. (2017). Porém, esta é uma abordagem diferenciada, pois os autores apresentaram uma nova abordagem para a estimativa do estado harmônico para sistemas de distribuição

trifásicos não balanceados usando PMU. A intenção desta metodologia foi de obter as correntes harmônicas das ramificações (ramais laterais ou secundários) em coordenadas retangulares, tornando-as variáveis de estado a serem estimadas pela metodologia. As tensões harmônicas e os fasores de corrente dos ramos são medidos nas barras monitoradas por PMUs. A principal contribuição do método foi de apresentar resultados satisfatórios quando a rede de distribuição não era totalmente observável, exigindo um pequeno número de medidas de campo.

Arruda, Kagan e Ribeiro (2010) apresentaram um novo método para a estimação das distorções harmônicas individuais e totais em todos os barramentos da rede elétrica, com base em medições das distorções harmônicas trifásicas em um número escasso de barras. A modelagem trifásica, segundo os autores, permite a estimativa das distorções harmônicas em sistemas desequilibrados. As distorções harmônicas de tensão são calculadas pela impedância nodal da matriz para cada ordem harmônica dada. Para a solução do problema foi proposto um algoritmo que utiliza estratégias evolutivas. Este algoritmo faz o uso de vários medidores de QEE, que possam ser sincronizados por GPS, ou usando informações do fluxo de carga na frequência fundamental, o que permite o sistema de monitoramento ser de baixo esforço computacional. Para validar o modelo de estimação harmônica, baseado em um algoritmo evolutivo, o mesmo foi aplicado ao sistema de transmissão do IEEE de 14 barras, com o intuito de comparar seu desempenho com uma abordagem convencional pelo Método de Monte Carlo. O método foi validado sobre uma rede de sub-transmissão de 50 barras com o objetivo de comparar as abordagens trifásicas e monofásicas, bem como a robustez do método proposto.

Para sintetizar este breve levantamento bibliográfico, a Tabela 5 apresenta os autores citados e as respectivas ferramentas utilizadas para a monitoração da distorção harmônica. Nela é possível observar a evolução das ferramentas e a implementação de novas técnicas para a extração dos dados relacionados aos componentes harmônicos.

Como pôde ser observado, até agora o foco da revisão bibliográfica apresentada foi com relação as ferramentas utilizadas e encontradas na literatura para a extração dos componentes harmônicos, e por consequência, melhor quantificar e caracterizar a distorção harmônica.

Contudo, vale lembrar que o objetivo do estudo investigativo realizado, e que será detalhadamente apresentado, foi de analisar uma específica ferramenta com o intuito de melhor observar a propagação da distorção harmônica sobre sistemas de distribuição.

Tabela 5 – Síntese dos principais pontos correlatos (ou de interesse) entre a revisão bibliográfica realizada nesta subseção e a pesquisa em desenvolvimento.

Pesquisadores	Contribuições							
	Técnicas Aplicadas							
	TRF	TDF	I	TW	RNA	PMUs	MQE	TA
Hartana e Richards (1990)					✓			
Phipps, Nelson e Sen (1994)	✓	✓	✓					
Meliopoulos et al. (2000)						✓		
Watson e Arrillaga (2003)								✓
Arruda, Kagan e Ribeiro (2010)							✓	
Ghaemi, Abyaneh e Mazlumi (2011)				✓				
Nascimento et al. (2013)					✓			
Melo et al. (2017)						✓		

Legenda:

TRF: Transformada rápida de Fourier;

TDF: Transformada discreta de Fourier;

I: Indicadores - Distorção harmônica individual e total da tensão;

RNAs: Redes neurais artificiais;

PMUs: *Phasor Measurement Units*;

MQE: Medidores de qualidade da energia elétrica;

TA: Técnicas de análises, como análise interativa de harmônicos, estimação do estado harmônico, técnicas no domínio do tempo, e a análise nodal.

De posse desta análise, acredita-se que os resultados poderão dar suporte a uma futura alocação de medidores/monitores de QEE que venham a ser sensibilizados e que realmente permitam registrar/monitorar os níveis de distorções que venham a ser manifestados.

Neste sentido, na sequência, serão reportados algumas pesquisas que tratam da alocação de medidores, mesmo não sendo este tópico motivo de desenvolvimento desta pesquisa.

2.2.6 Alocação de Medidores Sensíveis à Distorção Harmônica

O número de trabalhos técnico-científicos que abordam a alocação de medidores sensíveis a distorção harmônica vem aumentando substancialmente nos últimos anos. As metodologias observadas variam de acordo com o objetivo do monitoramento proposto (JUNIOR; SILVA; FILHO, 2016).

No que tange à medição, a alocação pode ter por finalidade a indicação da má operação da rede, como, por exemplo, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs), com destaque aos afundamentos de tensão (OLGUIN; VUINOVICH; BOLLEN, 2006; HERNANDEZ et al., 2013; MARTINS et al., 2016; KEMPNER, 2016; GOMES, 2016), ou ainda a alocação ótima para a medição da distorção harmônica, a qual será retratada nesta seção especificadamente. Outra abordagem em relação a alocação é com o intuito de mitigar algum fenômeno observável no SEP, como, por exemplo, a alocação e dimensionamento

de bancos de capacitores (EAJAL; EL-HAWARY, 2010; ONAKA et al., 2016), ou até mesmo alocação de PMUs com o intuito de monitorar os eventos do SEP (RAKPENTHAI et al., 2005).

Com relação a alocação de medidores sensíveis às distorções harmônicas, a literatura é bem escassa, trazendo poucas abordagens sobre o tema. No que segue, será então apresentado alguns dos proeminentes trabalhos encontrados até o momento.

Farach, Grady e Arapostathis (1993) apresentam a alocação dos medidores para estimar os locais (as origens) das fontes harmônicas no SEP. Com certa segurança, este trabalho representa o início dos estudos nesta área. As contribuições relevantes apresentadas, segundo os autores, são a alocação dos medidores e a estimação da localização das fontes harmônicas no SEP. Como solução destes problemas, os autores apresentam uma análise da sensibilidade e a utilização do critério da variância mínima.

Outros estudos relevantes que consideram a identificação das fontes harmônicas no SEP são os trabalhos de D'Antona, Muscas e Sulis (2009) e de Ortega et al. (2005). Continuando na mesma linha de pesquisa, D'Antona et al. (2011) propõem um estimador de fonte harmônica, que possui o objetivo de avaliar as principais fontes harmônicas em uma pequena rede de distribuição. A metodologia desenvolvida permitiu uma localização preliminar das cargas que injetavam componentes harmônicas no SEP analisado.

Madtharad et al. (2005) também apresentam contribuições relevantes com relação à alocação ótima de medidores. Neste trabalho os autores retrataram o número ideal de medidas e as melhores posições para alocar os medidores a fim de identificar os locais e as magnitudes das fontes harmônicas.

Outra abordagem importante é a de Kumar, Das e Sharma (2005b), na qual se apresenta uma simples estratégia de posicionamento dos medidores para monitorar o estado harmônico do SEP. Segundo os autores, a técnica é facilmente implementável e adequada, mesmo quando apenas alguns locais de medição das harmônicas foram selecionados. Contudo, diferente da proposta deste trabalho que é estudar a alocação em sistemas de distribuição, Kumar, Das e Sharma (2005b) avaliam o desempenho da estratégia frente a um sistema de transmissão do IEEE de 14 barras. Uma contribuição do método proposto pelos autores é que o mesmo é capaz de identificar a presença de uma nova fonte harmônica que não tenha sido anteriormente retratada no sistema, utilizando RNAs. A metodologia proposta para a alocação dos medidores, baseia-se na sensibilidade da linha do barramento atual nas quais as correntes harmônicas são injetadas, ou seja, verifica

qual o barramento é mais sensível utilizando injeções de harmônicas nos mesmos. Com relação ao monitoramento das fontes harmônicas, usaram-se as medidas disponíveis dos medidores harmônicos alocados no sistema para alimentar as RNAs, com o intuito de realizar o monitoramento destas fontes.

Com o propósito de explorar outros métodos, os mesmo autores Kumar, Das e Sharma (2005a) apresentaram um método baseado em Algoritmo Genético (AG) para resolver o problema da alocação ótima de medidores para a estimação das fontes harmônicas no SEP. Para avaliar a sensibilidade do SEP frente à distorção harmônica foi utilizado o método da variância mínima, relatado por Farach, Grady e Arapostathis (1993). Além disso, os autores relataram que as soluções obtidas pelo método utilizando AG apresentaram resultados melhores do que as outras técnicas avaliadas até então na literatura.

Seguindo na mesma linha da utilização de AGs inteligentes para alocação ideal de medidores de QEE, Ketabi, Sheibani e Nosratabadi (2012) apresentaram um método para alocação ótima, utilizando um algoritmo de otimização. O algoritmo de otimização escolhido foi o SOA (*Seeker Optimization Algorithm*, ou Algoritmo de otimização de busca). Segundo Wang, Cheung e Liu (2006), o mesmo é superior ao AG contínuo e ao Particle Swarm Optimization (PSO). A alocação é realizada minimizando a soma ponderada dos erros máximos relativos obtidos pelo estimador do estado harmônico, para todas as ordens harmônicas existentes.

Reforçando a ideia da alocação de medidores, com o intuito de realizar a estimação do estado harmônico, minimizando o erro de estimação, como retratado em alguns dos artigos anteriormente apresentados nesta seção, Rad, Mokhtari e Karimi (2012) apresentaram um método para a alocação ótima dos medidores e análise da observabilidade para a estimativa do estado harmônico do SEP. Os autores lembraram que a tarefa do estimador de estado harmônico é identificar os locais e as magnitudes das fontes harmônicas e realizar a estimação da tensão e corrente harmônica, utilizando medidas parciais. Neste artigo, foi proposto um novo algoritmo de ordem sequencial, com o intuito de melhorar o método apresentando por Farach, Grady e Arapostathis (1993).

Continuando os estudos nesta área, Rad, Mokhtari e Karimi (2013) apresentaram um algoritmo que usa várias ferramentas para realizar a alocação ótima e garantir a observabilidade do SEP diante da distorção harmônica. Dentre as ferramentas utilizadas, pode-se citar: o critério da variância mínima, relatada por Ketabi, Sheibani e Nosratabadi (2012), Farach, Grady e Arapostathis (1993); o método sequencial para a realização da

alocação ótima dos medidores de QEE (FARACH; GRADY; ARAPOSTATHIS, 1993); a técnica da decomposição em valores singulares, que utiliza as correntes de injeção harmônica nodal para resolver o problema de minimização e, conseqüentemente, realizar a análise da observabilidade do SEP; e, finalmente, o método *Weighted Least Square (WLS)*, que é um método simples e rápido, utilizado para a estimação do estado harmônico (MELIOPOULOS; ZHANG; ZELINGHER, 1994). O método proposto minimiza o número de dispositivos de medição e o erro de estimação ao mesmo tempo, tornando o sistema totalmente observável. O algoritmo proposto foi testado em uma rede de transmissão do Irã. Semelhante á este método, Liao (2007) descrevem um novo estimador do estado harmônico para identificar as fontes harmônicas usando menos medidores e variáveis de estado. A problemática abordada é que em um sistema pouco determinado, uma observabilidade total não pode ser assegurada através das abordagens tradicionais de observabilidade. Por isso, os autores propõem um estimador de estado harmônico considerando as injeções harmônicas nodais, e as variáveis de estado, sendo testado em um sistema equilibrado.

Vale comentar sobre o trabalho de Dzienis, Komarnicki e Styczynski (2007), que focou na instalação de medidores de QEE nos nós sensíveis de um sistema de distribuição. O método desenvolvido é baseado no cálculo do fluxo de carga na frequência fundamental. O algoritmo também obtém a matriz Jacobiana do sistema, a qual reflete o ponto de operação do SEP. Para a identificação dos barramentos mais susceptíveis à distorção harmônica, foi utilizada a decomposição em valores singulares. Contudo, o método apresentado expõe uma fragilidade, pois, existem SDs onde a matriz Jacobiana se torna singular, impossibilitando a utilização do método de Newton-Raphson para o cálculo do fluxo de carga.

No contexto desta pesquisa, voltada para SDs, vale comentar sobre a pesquisa de Muscas et al. (2007). A finalidade da pesquisa foi de apresentar uma alocação ótima de dispositivos de medição para a estimativa do estado harmônico considerando os parâmetros de incerteza das redes de distribuição. Como contribuição do trabalho, os autores apresentam um algoritmo de otimização que tem a finalidade de minimizar o custo, a quantidade ideal de medidores e a posição destes instrumentos no SEP. O método de otimização é baseado na programação dinâmica e leva em consideração, por meio de procedimentos adequados, o Método de Monte Carlo, a demanda variável das cargas e as incertezas das medições, como também uma tolerância dos valores de impedância das linhas. A característica mais importante da metodologia proposta é representada pelo

fato de que o método de otimização permite, simultaneamente, considerar um ou vários canais de medição dos instrumentos. Para a realização da estimação do estado harmônico também foi utilizado a decomposição em valores singulares.

Outros autores que também apresentaram trabalhos relevantes com relação a sistemas de distribuição foram Breda, Vieira e Oleskovicz (2016). Este trabalho propõe um algoritmo para realizar a estimação do estado harmônico, usando a técnica de decomposição em valores singulares. Segundo os autores, esta técnica possibilita indicar quantos medidores devem ser instalados para melhorar a observabilidade do SEP como um todo.

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentada uma breve introdução sobre a distorção harmônica e a problemática encontrada nos SDs diante deste fenômeno. Sabe-se que a fonte da distorção harmônica no SEP está diretamente relacionada às cargas não lineares instaladas no mesmo. Sendo assim, tem-se a constante preocupação de melhor entender este fenômeno e buscar meios de mitigação para evitar danos maiores ao SEP como um todo. Além dos danos causados aos equipamentos, a presença de componentes harmônicas também está sujeita à aplicações de normas e regulamentações, como é o caso do módulo 8 do PRODIST, no cenário brasileiro.

Outro aspecto importante retratado neste capítulo foi a necessidade de se modelar e simular com precisão os possíveis problemas causados pela presença de harmônicas oriundas das cargas não lineares ou perturbadoras. Conforme retratado, para a análise de cargas não lineares de grande porte, as principais técnicas foram divididas em modelagens no domínio do tempo e no domínio da frequência. Da literatura consultada, pôde-se citar três métodos envolvendo simulações no domínio da frequência: matriz de admitância, iteração harmônica e o algoritmo newtoniano.

A matriz de admitância, tem a vantagem de não requerer qualquer conhecimento detalhado da modelagem do sistema. Já o método da iteração harmônica, necessita de um maior conhecimento da carga a ser modelada, obtendo resultados mais precisos do que pelo método da matriz de admitância. O algoritmo newtoniano consegue resolver simultaneamente as equações do sistema e a da carga. Este método apresenta a desvantagem em ser um pouco mais restrito, pois, os modelos (equações) das cargas não são de domínio público, sendo, usualmente, reservados aos fabricantes.

Com relação aos trabalhos correlatos a esta pesquisa, evidenciaram-se duas sub áreas de interesse. Uma diz respeito às medições das distorções harmônicas no SEP, e a outra, as técnicas aplicadas para a alocação de medidores sensíveis às distorções harmônicas.

Para realização das medições, encontrou-se uma vasta descrição das ferramentas utilizadas, principalmente as dispendo das variações da TF, da TW, ou até mesmo a utilização de técnicas inteligentes. Pode-se também citar a utilização das PMUs.

Outra frente observada foi a identificação dos locais das fontes poluidoras no SEP, que é uma nova linha de medição para apontar onde estão as cargas perturbadoras para, posteriormente, propor soluções para mitigar a distorção harmônica observada.

No que diz respeito à alocação de medidores sensíveis à distorção harmônica, pode-se ressaltar o número reduzido de trabalhos com foco em sistemas de distribuição. Desta maneira, vale adiantar que este ponto foi bastante desafiador para esta pesquisa. Pela revisão, verificou-se também que as ferramentas utilizadas para identificar os barramentos mais susceptíveis à distorção harmônica são diferenciadas do que é proposto neste trabalho, que tomará como direcionamento o método proposto por Xu et al. (2005).

Portanto, para que se fosse possível melhor avaliar o trabalho reportado por Xu et al. (2005), foi inicialmente necessário recapitular conceitos básicos relacionados à ressonância harmônica, para, posteriormente, aplicar a mesma análise em outros cenários na presença de distorção harmônica. Por este motivo o capítulo que segue trará conceitos básicos sobre a ressonância harmônica e métodos aplicados para a identificação da condição de ressonância, bem como de trabalhos técnico-científicos correlatos necessários para um melhor entendimento desta pesquisa desenvolvida.

Ressonância Harmônica

Ao longo dos anos tornou-se importante estudos voltados ao aumento da inserção das cargas não lineares nos SEPs, visto que estas tendem a operar com fator de potência relativamente baixo (MASOUM; FUCHS, 2015). Para sanar tal problema, uma solução é a instalação de bancos de capacitores próximos a estas cargas ou nos barramentos do sistema elétrico. Porém, a má alocação destes capacitores pode gerar impactos negativos tanto aos clientes como para as concessionárias de energia (MASOUM; FUCHS, 2015).

Dentre os impactos negativos vale ressaltar (MASOUM; FUCHS, 2015):

- ❑ a amplificação e a propagação das componentes harmônicas, resultando no superaquecimento dos equipamentos do SEP, bem como a inutilização dos próprios bancos de capacitores;
- ❑ o surgimento de condições de ressonâncias harmônicas paralelas;
- ❑ condições de desequilíbrio de tensão ou de corrente, que podem causar a má operação dos dispositivos de proteção; e
- ❑ problemas de qualidade da energia elétrica, como, por exemplo, o surgimento de correntes de descargas dos capacitores e sobretensões transitórias devido as trocas dos mesmos.

Neste contexto, vale frisar que o impacto negativo causado pela inserção de bancos de capacitores nos SEPs abordado nesta dissertação, será sobre questões que norteiam a condição de ressonância harmônica.

3.1 A Condição de Ressonância

Como já dito, o estudo da ressonância é muito importante, por esta impactar na operação de uma grande variedade de sistemas elétricos e eletrônicos utilizados atualmente. O circuito ressonante pode ser caracterizado por uma combinação de elementos como resistor (R), capacitor (C) e indutor (L), apresentando uma resposta em frequência característica, semelhante à da Figura 6 (BOYLESTAD, 2004).

Figura 6 – Uma resposta em frequência característica.

Fonte: Adaptado de (BOYLESTAD, 2004)

De acordo com Boylestad (2004), o conceito da ressonância não se limita à sistemas eletrônicos ou elétricos. O sistema ressonante pode ser, mecânico, hidráulico, acústico, ou algum outro tipo (HAYT; KEMMERLY; DURBIN, 2012).

Já em circuitos elétricos, quando aplicada uma frequência apropriada (f_r), a energia armazenada em um elemento reativo (por exemplo, capacitivo) é igual à fornecida pelo outro elemento reativo (para ilustrar, indutivo). Ou seja, a energia oscila entre os mesmos. Portanto, uma vez que um sistema ideal (com capacitor e indutor puros) atinge um estado de ressonância, este não necessita mais de potência reativa, já que, é auto-sustentando (BOYLESTAD, 2004). Em outras palavras, a condição de ressonância ocorre quando a reatância capacitiva do sistema compensa sua reatância indutiva, deixando apenas os elementos resistivos do sistema como os únicos meios de limitar as correntes ressonantes (MASOUM; FUCHS, 2015). Já de acordo com Hayt, Kemmerly e Durbin (2012), em um sistema elétrico de dois terminais, contendo pelo menos um indutor e um capacitor, define-

se que o sistema estará em ressonância, quando a tensão e a corrente nos terminais de entrada estiverem em fase.

Em função da topologia e conexões entre os elementos de um determinado circuito elétrico, pode-se apontar dois tipos de ressonância: a ressonância série e a em paralelo. Ambos serão discutidos na sequência.

3.1.1 Ressonância em Série

O circuito RLC série, como apresentado na Figura 7, tem uma impedância de $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ (Ω). O circuito ressonante em série, entra em ressonância quando a reatância indutiva X_L é igual a reatância capacitiva X_C (GUSSOW, 1997).

Figura 7 – Diagrama esquemático de um circuito RLC para caracterizar a ressonância série.

Fonte: Adaptado de (GUSSOW, 1997)

Portanto:

$$X_L = X_C$$

Onde:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Consequentemente, a frequência em que o circuito em série entrará em ressonância é:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

Sendo: f a frequência de ressonância especificadas em Hertz (Hz); L a indutância, em Henry (H); e C a capacitância, em Farady (F).

Como na ressonância em série a impedância (Z) do circuito é igual a resistência (R), a impedância é mínima (Figura 8). Nesta situação, o circuito tem uma corrente máxima determinada por $I = \frac{V}{R}$ (GUSSOW, 1997).

De acordo com a Figura 8, para valores de frequência abaixo da frequência de ressonância (f_r), X_C é maior que X_L , de modo que o circuito é principalmente caracterizado pela resistência e reatância capacitiva. Entretanto, quando os valores de frequências são maiores que o valor da (f_r), X_L é maior que X_C , de modo que o circuito é predominantemente resistivo e indutivo (GUSSOW, 1997).

Figura 8 – Curva de resposta da impedância de um circuito RLC série.

Fonte: Adaptado de (GUSSOW, 1997)

3.1.2 Ressonância em Paralelo

A frequência de ressonância de um circuito em paralelo (Figura 9) também é definida como a frequência para qual o circuito responde apenas como um circuito resistivo. Ou seja, a ressonância em paralelo ocorre quando a reatância indutiva é igual a reatância capacitiva (GUSSOW, 1997).

Figura 9 – Diagrama esquemático de um circuito RLC para caracterizar a ressonância em paralelo.

Fonte: Adaptado de (GUSSOW, 1997)

A frequência de ressonância para o circuito em paralelo da Figura 9 é:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (6)$$

Onde:

f_r é a frequência de ressonância (Hz);

L é a indutância em Henry (H);

C é a capacitância em Faraday (F); e

R é a resistência em Ohm (Ω).

Porém, se o fator de qualidade (Q) da bobina for maior que 10, ou $\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{L^2}$, na prática, o termo $\frac{R^2}{L^2}$ da Equação 6 pode ser desprezado. Deste modo a Equação 6 acaba se tornando a mesma como utilizada na ressonância em série (Equação 5) (GUSSOW, 1997).

Outra equação encontrada na literatura para a frequência de ressonância em paralelo é como a apresentada em 7 (Masoum e Fuchs (2015)):

$$f_r = f_1 \times \sqrt{\frac{1000 \times S_{cc}}{Q_{cap}}} \quad (7)$$

Sendo:

f_r a frequência de ressonância (Hz);

f_1 a frequência fundamental do sistema (Hz);

S_{cc} a potência de curto-circuito do barramento (MVA); e

Q_{cap} potência reativa do capacitor (kVAr).

Diferente do circuito ressonante em série, na qual a impedância era mínima (Figura 8), no circuito ressonante em paralelo, a impedância é máxima na frequência de ressonância e diminui para frequências abaixo e acima da mesma, como mostra a Figura 10 (BOYLESTAD, 2004; GUSSOW, 1997).

Figura 10 – Curva de resposta da impedância de um circuito ressonante em paralelo.

Concluindo esta seção, a Tabela 6 aborda de maneira mais sucinta os tipos e as principais informações das ressonâncias harmônicas apresentadas.

Tabela 6 – Os tipos e as principais informações das ressonâncias harmônicas.

Ressonância Série	Ressonância Paralela ($Q > 10$)
$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
Impedância Z é mínima em f_r	Impedância Z é máxima em f_r
Abaixo de f_r : Capacitivo	Abaixo de f_r : Indutivo
Acima de f_r : Indutivo	Acima de f_r : Capacitivo

3.2 Métodos para a Identificação da Condição de Ressonância

Como já descrito anteriormente, a ressonância harmônica paralela ocorre quando os elementos indutivos e capacitivos do sistema estão em paralelo e a magnitude da impedân-

cia é máxima. Já para a ressonância harmônica série, ocorre quando a reatância indutiva e capacitiva do sistema estão em série e a magnitude da impedância é mínima (MASOUM; FUCHS, 2015).

Com isso, é possível verificar que a variável homóloga nos dois tipos de ressonância é a impedância, e que nas duas circunstâncias a mesma tende aos extremos quando ocorre a frequência na qual o sistema entra em ressonância. Por isso, conclui-se que buscando estes extremos, conseqüentemente, será possível localizar a frequência que está causando a ressonância (MASOUM; FUCHS, 2015).

Para a determinação destes extremos e das frequências ressonantes, existe uma técnica básica, a saber: a varredura em frequência. Além desta clássica, na literatura pode-se também encontrar uma terceira técnica, a AMRH (XU et al., 2005).

Nesta seção será apresentada uma breve conceituação teórica sobre a primeira e uma abordagem mais completa da teoria da análise modal, por esta ser a técnica escolhida para o estudo inicial da ressonância harmônica neste trabalho.

3.2.1 Varredura em Frequência

O método da varredura em frequência é a técnica mais simples e a mais comum a ser empregada para a análise harmônica, por necessitar de poucas informações sobre o sistema em análise (BONNER et al., 1996; ARRILLAGA; WATSON, 2003; DAS, 2017).

A técnica se baseia no cálculo e na representação gráfica da magnitude da impedância na barra analisada para uma gama de frequências (LEITE et al., 2012; DAS, 2017).

Em essência, a varredura em frequência determina a impedância da rede vista a partir de uma certa barra que varia de acordo com a frequência. Tipicamente, uma corrente de 1 p.u. é injetada em um barramento k e a tensão manifestada no barramento k é calculada. Este procedimento é repetido para uma faixa de frequência. O cálculo das tensões é baseada na Equação 8 (ARRILLAGA; WATSON, 2003; LEITE et al., 2012; DAS, 2017).

$$V_f = Z_f \times I_f \quad (8)$$

Sendo:

V_f o vetor de tensão para cada frequência;

Z_f a matriz de impedância do barramento para cada frequência; e

I_f o vetor de injeções de correntes para cada frequência.

Em um estudo típico, apenas o elemento k_{th} do vetor I_f tem o valor de 1 p.u., enquanto os outros elementos são zero, como mostra a Equação 9. Desta forma, o resultado do vetor V_f corresponde à coluna k_{th} da matriz impedância do barramento para a frequência em estudo (ARRILLAGA; WATSON, 2003; LEITE et al., 2012).

$$V_f = Z_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f^{1,k} \\ \vdots \\ Z_f^{k,k} \\ \vdots \\ Z_f^{n,k} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Essa técnica é bem consolidada na literatura (MAZHARI; SAHAMI; KOUHSARI, 2018; EGGENSCHWILER et al., 2017; LEITE et al., 2012), sendo muito utilizada para a identificação das frequências que tendem a entrar em ressonância harmônica e dos nós que serão excitados com as mesmas. Porém, a técnica não apresenta mais informações sobre o evento, devido às complicadas interações entre os elementos armazenadores de energia e as prováveis fontes de injeções harmônicas, que dificultam a caracterização do problema do ponto de vista da observabilidade e excitabilidade (sensibilidade) da ressonância harmônica (XU et al., 2005).

3.2.2 Análise Modal da Ressonância Harmônica

A análise modal também é uma ferramenta bem consolidada e muito utilizada em estudos de sistemas dinâmicos (OKUBO; SUZUKI; UEMURA, 1978). De posse destes conhecimentos Xu et al. (2005) aplicaram a técnica nos estudos envolvendo a ressonância harmônica e obtiveram resultados relevantes sobre o tema.

O método então descrito pelos autores permite apontar as barras nas quais uma injeção de corrente harmônica pode excitar mais facilmente o modo da ressonância harmônica (sensibilidade da barra), e, também, quais barras onde a ressonância pode ser observada (monitorada) com mais facilidade (observabilidade da barra). Ademais, a análise da ressonância modal, quando aplicada a estudos de sensibilidade, permite identificar quais são os componentes envolvidos na ressonância harmônica e quão longe seus efeitos podem se propagar no SEP.

Nas subseções que seguem serão abordados os conceitos da análise modal aplicada ao estudo da ressonância harmônica nos SEPs.

3.2.2.1 Modos de Ressonância

Sabe-se que a condição de ressonância harmônica está diretamente relacionada com o menor autovalor da matriz de admitância (XU et al., 2005; HUANG; CUI; XU, 2007). Além do mais, realizando a decomposição espectral da matriz de admitâncias (BELLMAN, 1970) do SEP, é possível obter os autovetores associados. Estes terão o potencial de caracterizar a excitabilidade (sensibilidade) e a observabilidade do modo crítico (modo de ressonância) do SEP. A excitabilidade também pode ser compreendida como uma forma de controlabilidade da barra, ou seja, os locais que apresentarem maior excitabilidade são os quais apresentam a melhor capacidade para injetar sinais que cancelam os harmônicos que estão gerando a ressonância harmônica.

Para melhor exemplificar esta técnica, considera-se um sistema com ressonância paralela acentuada na frequência f , de acordo com a análise de varredura em frequência. Isto significa que alguns elementos do vetor de tensão calculados a partir da Equação 10 apresentam valores elevados em f .

$$[V_f] = [Y_f]^{-1}[I_f] \quad (10)$$

Onde $[Y_f]$ é a matriz de admitância do sistema na frequência f . $[V_f]$ é a tensão nodal e $[I_f]$ a corrente de injeção nodal, respectivamente. Lembrando que $[I_f]$ tem apenas um valor de entrada, 1.0 p.u., sendo os outros elementos iguais a zero (0). Para simplificar a notação, na sequência, o subíndice f será omitido.

A ressonância harmônica acentuada, implica na existência de tensões nodais elevadas no sistema elétrico em análise. Isso ocorrerá quando a matriz de admitância $[Y]$ se aproximar da singularidade. Investigar como a matriz torna-se singular é, portanto, uma maneira atraente de analisar o problema. Para melhor compreender o problema, uma teoria de autoanálise pode ser aplicada para este propósito, como, por exemplo, a teoria apresentada por Bellman (1970), onde a matriz de admitância pode ser decomposta da seguinte forma:

$$[Y] = [E][\Lambda][D] \quad (11)$$

Onde $[\wedge]$ é a diagonal da matriz dos autovalores, sendo $[E]$ e $[D]$ os autovetores esquerdo e direito das matrizes, respectivamente.

Outra conexão importante com relação aos autovetores, é que o autovetor esquerdo é o inverso do autovetor direito, como descrito na Equação 12:

$$[D] = [E]^{-1} \quad (12)$$

Substituindo a Equação 11 na Equação 10, obtêm-se:

$$[V] = [E][\wedge]^{-1}[D][I]$$

Ou:

$$[D][V] = [\wedge]^{-1}[D][I] \quad (13)$$

Definindo que $[U] = [D][V]$ é o vetor de tensão modal, e $[J] = [D][I]$ é o vetor de corrente modal, a equação 13 pode ser simplificada:

$$[U] = [\wedge]^{-1}[J]$$

Ou:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

Da Equação 14, pode-se concluir que se $\lambda_1 = 0$, ou apresentar um valor muito pequeno, aparecerá uma pequena injeção no modo 1 de corrente J_1 levando a uma elevação de tensão U_1 no modo 1. As outras tensões modais não serão afetadas porque não possuem um acoplamento com a corrente do modo 1. Em outras palavras, pode-se facilmente identificar a localização da ressonância. A implicação é que a ressonância realmente ocorre para um modo específico. Não está relacionada ou é causada por uma injeção particular na barra.

3.2.2.2 Autovalores e Autovetores

A implementação da matriz de admitância harmônica em termos de seus autovalores e autovetores próprios é relatada na literatura por Carpinelli et al. (1998). Já naquela época os autores relatam a relevância da metodologia para melhor analisar problemas que envolvem harmônicos. Além disto, a metodologia também pode dar suporte para a alocação ótima de condicionadores de linhas e também ser capaz de proporcionar uma previsão sobre quais condições podem levar o sistema a ressonância harmônica. Esta última abordada por Xu et al. (2005).

Reforçando o que já foi exposto anteriormente, o autovalor crítico é o menor autovalor da matriz de admitância, sendo o ponto no qual ocorreu a frequência de ressonância (XU et al., 2005). Desta maneira, o autovetor apresentará alguns potenciais das barras, como a observabilidade e a sensibilidade. Sabe-se, de acordo com Xu et al. (2005), que a barra que apresentar o maior autovetor esquerdo (E), será a barra que irá apresentar o maior nível de observabilidade do sistema. Da mesma maneira, a barra que apresentar o maior autovetor direito (D), caracterizará a barra com o maior nível de sensibilidade do sistema.

De acordo com Xu et al. (2005), os autovalores e autovetores podem ser definidos conforme a Equação 11 que segue:

$$[\Lambda] = [E]^{-1}[Y][E] \quad (15)$$

Como $[Y] = [Y]^T$ e $[\Lambda]$ é a diagonal da matriz, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} [\Lambda] &= [\Lambda]^T = ([E]^{-1}[Y][E])^T \\ [\Lambda] &= [E]^T Y^T ([E]^{-1})^T = [E]^T Y ([E]^{-1})^T \end{aligned} \quad (16)$$

Comparando a Equação 15 com a Equação 16, pode-se concluir que $[E]^{-1} = [E]^T$. Como $[D] = [E]^{-1}$, tem-se que $[D] = [E]^T$, ou seja, o autovetor esquerdo $[E]$ é igual ao autovetor direito $[D]$. O que segundo os autores é uma conclusão muito importante, pois, revela as características únicas da ressonância harmônica.

Para melhor compreensão da técnica da análise modal e das ferramentas utilizadas para o cálculo da mesma, a seguir será apresentado uma breve descrição sobre a teoria matemática dos autovalores e autovetores conforme apresentada em Peres e Bonatti (2007).

De acordo com os apontamentos encontrados, um escalar $\lambda \in C$ é um autovalor (valor próprio) de $A \in R^{n \times m}$ se existir um vetor $x \in C^n$ não nulo que satisfaça a Equação 17:

$$Ax = \lambda x \quad (17)$$

De modo que qualquer vetor $x \in C$ que satisfaça a Equação 17 é chamado de autovetor (vetor próprio) de A associado à λ (mais precisamente, esta é a definição para autovetores à direita de A).

Note que $\lambda \in C$ será um autovalor de $A \in R^{n \times m}$ se a Equação 18 for válida:

$$\Delta(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I} - A) = 0 \quad (18)$$

Onde $\mathbf{I}$ é a matriz identidade.

Essa condição é equivalente à existência de $y \in C$ tal que satisfaça a Equação 19:

$$yA = \lambda y \implies y(\lambda \mathbf{I} - A) = 0 \quad (19)$$

Desde modo, qualquer y que satisfaça a Equação 19 é chamado de autovetor à esquerda de A (associado ao autovalor λ).

3.2.2.3 Fator de Participação

Conforme descrito por Xu et al. (2005), é possível combinar a excitabilidade (sensibilidade) e a observabilidade do sistema em um único índice de acordo com a teoria da análise modal seletiva (PEREZ-ARRIAGA; VERGHESE; SCHWEPPE, 1982), da seguinte forma:

$$[V] = [E][\wedge]^{-1}[D][I] = [E] \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} [D][I]$$

$$[V] \approx \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{4n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{4n} \end{bmatrix} [I]$$

$$\begin{aligned}
[V] &= \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} E_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ \lambda_1^{-1} E_{21} & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \lambda_1^{-1} E_{n1} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1n} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \cdots & D_{nn} \end{bmatrix} [I] \\
[V] &= \lambda_1^{-1} \begin{bmatrix} E_{11} D_{11} & E_{11} D_{12} & \cdots & E_{11} D_{1n} \\ E_{21} D_{21} & E_{21} D_{22} & \cdots & E_{21} D_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{n1} D_{n1} & E_{n1} D_{n2} & \cdots & E_{n1} D_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (20)
\end{aligned}$$

A aproximação é possível porque λ_1^{-1} (impedância modal crítica), é muito maior do que as outras impedâncias modais. Os elementos diagonais da matriz (Equação 20) caracterizam a excitabilidade (sensibilidade) combinada com a observabilidade do modo crítico da mesma barra. Estes elementos são chamados de FP para o modo crítico.

O FP é definido como $FP_{bm} = E_{bm} D_{bm}$, onde o b é o número da barra, e m é o número do modo (XU et al., 2005).

Portanto, como os autovetores esquerdo e direito são iguais, o FP é igual ao quadrado dos autovetores. A compreensão deste fator possibilitará encontrar o centro de ressonância, ou seja, o local onde está ocorrendo o fenômeno. De acordo com os autores, a barra que apresentar o maior FP, será o local que está em ressonância. Outra conclusão relatada pelos autores é que a magnitude do índice caracterizará até que ponto a ressonância irá se propagar no SEP.

3.2.2.4 Impedância Modal

Ainda de acordo com Xu et al. (2005), a impedância modal é o inverso dos autovalores obtidos da matriz de admitância, conforme denota a Equação 21.

$$Z_m = \lambda^{-1} \quad (21)$$

Esta impedância possibilitará obter qual é a frequência que está entrando em ressonância no SEP, ou seja, a frequência que apresentar a maior impedância modal é a que estará em ressonância harmônica

3.3 Trabalhos Correlatos

Até o momento foi reportada a parte teórica sobre a ressonância harmônica e as ferramentas utilizadas para a identificação do problema. Na sequência serão brevemente comentados alguns dos trabalhos técnico-científicos consultados e correlacionados ao tema desta pesquisa.

3.3.1 Abordagens Gerais

Como a ressonância está ligada principalmente a inserção de capacitores no sistema elétrico devido as interações deste com a impedância do indutiva do sistema, em Pongriwat e Premradeepreechacham (2004), é possível verificar que conforme for aumentando ou diminuindo o valor capacitivo instalado, a frequência de ressonância também se desloca. Além do mais, quanto maior for o tamanho deste capacitivo, o sistema tende a se excitar para frequências mais baixas.

Outro aspecto abordado na literatura e apresentado experimentalmente em Meliopoulos, Cokkinides e Chakravarthi (1989) é que a resistividade do solo e o aterramento das cargas também possuem um papel importante para a determinação das características que levam o sistema ao estado de ressonância.

Já Currence, Plizga e Nelson (1995) discorrem sobre a preocupação do setor industrial em relação a ressonância harmônica, pois já naquela época aproximadamente 50% das cargas instaladas consistiam em fontes chaveadas e controladores de velocidades ajustável para motores de indução. Atualmente, sabe-se que cada vez mais tem-se a inserção de cargas não lineares no sistema devido ao avanço da eletrônica de potência no setor.

Nos dias atuais, com a implementação crescente de painéis fotovoltaicos no SEP, Hu et al. (2015) evidenciam a preocupação em relação aos filtros utilizados nos inversores destes painéis com a finalidade de mitigar as altas frequências, mas podendo permitir condições de ressonância harmônica. Uma abordagem análoga é a de Rauma et al. (2012), porém com o foco nas usinas eólicas, por estas possuírem muitos elementos indutivos e capacitivos. Outra abordagem relevante neste contexto é a de Nie et al. (2015), no qual apresentam estudos da ressonância harmônica no contexto das microrredes (*microgrids*). Estas abordagens são interessantes, devido ao novo cenário que vem se formando nestes últimos anos tender a inserção crescente de painéis fotovoltaicos e de usinas eólicas, inclusive com outras fontes de energia, permitindo ainda mais a formação de microrredes

específicas.

Como já foi discutido anteriormente e citado por Simpson (2005), existe uma preocupação com relação a alocação dos bancos de capacitores sem um estudo prévio do sistema, devido os mesmos poderem excitar a ressonância harmônica. Logo, pode-se citar o trabalho de Ayoubi, Hooshmand e Esfahani (2017), no qual este apresenta um novo índice de ressonância, com o intuito de contribuir para uma melhor alocação destes considerando uma alocação simultânea dos capacitores na rede como um todo. Este índice tem a finalidade de restringir os locais que serão alocados os bancos de capacitores, evitando que os mesmos levem o sistema a condição ressonância harmônica.

Em Galland et al. (2018), o estudo da ressonância harmônica está relacionado com a expansão das redes elétricas, voltadas para linhas de corrente alternada subterrâneas de médias e longas distâncias e linhas High Voltage Direct Current - Corrente Contínua em Alta Tensão (HVDC) de curtas a longas distâncias.

Pode-se citar também o trabalho de Eggenschwiler et al. (2017), no qual se estuda as ferramentas aplicadas no estudo da ressonância harmônica tanto para sistemas de transmissão como de distribuição. Para os sistemas de transmissão os autores citam a tendência da implementação de redes subterrâneas, visto que estas possuem cabos com uma maior capacitância do que os utilizados nas linhas áreas e de poderem alterar as frequências de ressonância já existentes no sistema. Já no contexto da distribuição, os autores apresentam a importância de se estudar a ressonância harmônica devido a inserção de medidores inteligentes e destes usarem Controlador Lógico Programável (CLPs) para se comunicar e serem mais propensos à interferências.

Verifica-se que as características inerentes do sistema elétrico acabam excitando a ressonância harmônica, contudo, além dos estudos para entender o evento, como os apresentados até então, existem maneiras de mitigá-los como o abordado em Li et al. (2015). Nesta pesquisa é proposta a aplicação de um filtro híbrido (filtragem ativa e passiva) com o intuito de amortecer a ressonância harmônica.

Até este momento fica evidente que foram e estão sendo realizados vários estudos voltados a ressonância harmônica devido à esta afetar negativamente o sistema elétrico. De posse disto a escolha da ferramenta de análise deste fenômeno é importante por esta auxiliar na mitigação do evento.

A varredura em frequência é a técnica mais utilizada e consolidada na literatura, como já foi descrito. Porém, a AMRH apresenta algumas vantagens que podem complementar

as conclusões já obtidas por meio da varredura em frequência. Por este motivo, será apresentada na sequência uma breve revisão bibliográfica sobre aplicações da técnica (AMRH), desde o seu surgimento até as melhorias propostas atualmente e encontradas na literatura correlata.

3.3.2 Direcionadas à AMRH

A técnica da AMRH (já descrita detalhadamente anteriormente) foi primeiramente apresentada por Xu et al. (2005). Neste trabalho os autores deixam claro que o método proposto é uma ferramenta valiosa para o estudo e análise harmônica. Complementando o estudo, Cui e Xu (2007) apresentam uma formulação modal alternativa utilizando matrizes modais simétricas.

Outros autores que complementam o artigo base (XU et al., 2005) são Huang, Cui e Xu (2007), os quais aplicam a teoria de auto-sensibilidade ao modo de ressonância harmônica. Esta aplicação tem a finalidade de ajudar a identificar os componentes da rede elétrica envolvidos em cada modo de ressonância. Essa informação é muito útil quando se tem a intenção de planejar estratégias para mitigar os problemas da ressonância harmônica.

Além disso, Yang, Liu e Zhang (2008) apresentam que a análise modal proposta por Xu et al. (2005) não consegue resolver problemas de ressonância harmônica em sistemas com ramificações com fontes de tensão constante e controlada, apresentando então uma melhoria do método para esta abordagem.

Outrossim, Yang, Liu e Wang (2009) apontam uma nova proposta para o estudo da ressonância em série, uma vez que a AMRH está mais voltada ao estudo da ressonância paralela do sistema.

Em Amornvipas e Hofmann (2010) a AMRH é aprimorada com relação a sua matriz de admitância, incluindo então estados de comutações do sistema, como curtos-circuitos e interrupções das linhas de transmissão, o que até então na literatura não era levado em consideração.

Em vista disso, Li et al. (2018) apresentam uma melhoria com relação ao tempo computacional da análise modal proposta em Xu et al. (2005). O método proposto neste trabalho visivelmente elimina as iterações desnecessárias, ocasionando uma melhoria na velocidade computacional. Portanto, ficam claras as melhorias envolvendo a AMRH, possibilitando cada vez mais a implementação da mesma na prática.

Consequentemente, a tudo que fora apresentado até então com relação a ressonância harmônica e a AMRH é possível concluir a importância de se estudar a ressonância harmônica e a técnica da AMRH e o quanto ainda se tem para contribuir nesta área.

Para sumarizar o que foi abordado até então, serão apresentadas duas tabelas (Tabela 7 e 8) contendo referências aos pesquisadores e as respectivas contribuições em relação as ferramentas utilizadas para a investigação da ressonância harmônica e também sobre os sistemas elétricos avaliados. Esta abordagem tem por objetivo ressaltar, melhor compreender, justificar e apresentar a contribuição que este trabalho terá quando da escolha da aplicação da AMRH em sistemas de distribuição de energia.

Com relação a Tabela 7 é possível verificar que a técnica da AMRH nos últimos anos conquistou espaço em relação a sua aplicação aos estudos da ressonância harmônica. Isto se deve pela mesma apresentar informações que antes não eram possíveis de se obter somente com a varredura em frequência. Outra conclusão importante é que mesmo a AMRH sendo uma técnica mais nova e com contribuições significativas, a varredura em frequência ainda é uma das técnicas mais empregadas, além de ser de fácil implementação. Por isso, verifica-se que para comprovar os resultados oriundos da aplicação da AMRH alguns autores aplicaram as duas técnicas em seus estudos.

De uma análise conjunta da Tabela 7 e da Tabela 8, verifica-se que se encontra na literatura apenas um trabalho com aplicação da AMRH em sistemas de distribuição, com os demais voltados para aplicações em sistemas de transmissão.

Tabela 7 – Síntese de alguns dos trabalhos consultados e dos métodos direcionados à análises da ressonância harmônica.

Pesquisadores	Contribuições		
	Métodos de Análises		
	VF	AMRH	MA
Meliopoulos, Cokkinides e Chakravarthi (1989)	✓		
Currence, Plizga e Nelson (1995)			✓
Pongsriwat e Premradeepreechacham (2004)	✓		
Xu et al. (2005)		✓	
Huang, Cui e Xu (2007)		✓	
Yang, Liu e Zhang (2008)		✓	
Yang, Liu e Wang (2009)		✓	
Amornvipas e Hofmann (2010)		✓	
Rauma et al. (2012)	✓	✓	
Nie et al. (2015)		✓	
Hu et al. (2015)	✓		
Li et al. (2015)	✓		
Ayoubi, Hooshmand e Esfahani (2017)	✓		
Eggenschwiler et al. (2017)	✓	✓	
Li et al. (2018)		✓	
Galland et al. (2018)	✓	✓	

Legenda:

VF: Varredura em frequência;

AMRH: Análise modal da ressonância harmônica; e

MA: Método analítico.

Tabela 8 – Síntese dos sistemas elétricos utilizados para validar a aplicação dos métodos de análises da ressonância harmônica.

Pesquisadores	Contribuições						
	Sistema Utilizado						
	SD	M	ST	SI	STe	SE	SST
Meliopoulos, Cokkinides e Chakravarthi (1989)	✓						
Currence, Plizga e Nelson (1995)				✓			
Pongsriwat e Premradeepreechacham (2004)	✓						
Xu et al. (2005)			✓				
Huang, Cui e Xu (2007)			✓	✓			
Yang, Liu e Zhang (2008)					✓		
Yang, Liu e Wang (2009)					✓		
Amornvipas e Hofmann (2010)			✓				
Rauma et al. (2012)						✓	
Nie et al. (2015)		✓					
Hu et al. (2015)	✓						
Li et al. (2015)	✓						
Ayoubi, Hooshmand e Esfahani (2017)	✓						
Eggenschwiler et al. (2017)	✓		✓				
Li et al. (2018)			✓				
Galland et al. (2018)			✓				✓

Legenda:

SD: Sistema de distribuição;

M: Microrredes;

ST: Sistema de transmissão;

SI: Sistema industrial;

STe: Sistema teste utilizado por Xu et al. (2005);

SE: Sistema teste de uma central eólica *offshore*; e

SST: Sistema de sub-transmissão.

3.4 Considerações Finais

Nesta seção foi possível verificar os métodos encontrados na literatura correlata para o estudo da ressonância harmônica. Cada método apresenta a sua peculiaridade. Entretanto, neste método não é possível apontar o quanto a barra é sensível e observável frente a ressonância harmônica. Por isso, Xu et al. (2005) propõe o método de análise modal da ressonância harmônica, que apresenta as mesmas informações dos outros dois métodos, além de apresentar esta quantificação das barras. Por este motivo, este trabalho optou por escolher esta ferramenta para o estudo investigativo.

Pela literatura consultada também é possível verificar que a varredura em frequência é a técnica mais usual para o estudo da ressonância harmônica. Contudo, nos últimos

anos verifica-se um aumento de estudos aplicando a técnica da AMRH. Vale ressaltar no entanto, que grande parte destes trabalhos encontrados possuem como foco sistemas de transmissão, e que para esta pesquisa, o foco será sobre sistemas de distribuição.

Metodologia de Pesquisa

Esta seção discorre sobre o estudo investigativo realizado, bem como os principais passos da metodologia seguida e retratada resumidamente na Figura 11.

Figura 11 – Metodologia proposta visando à análise dos barramentos de um sistema de distribuição qualquer frente às distorções harmônicas.

A primeira etapa da pesquisa diz respeito à modelagem dos sistemas de distribuição testes sobre o quais foi realizado o estudo investigativo de aplicação da análise de ressonância modal e, posteriormente, a obtenção das primeiras informações referentes às distorções harmônicas. Para esta modelagem computacional dos sistemas testes foram necessárias informações como: a quantidade de barramentos dos SDs testes; dados dos transformadores de potência das subestações; e dados das linhas e dos cabos utilizados,

bem como das cargas lineares e não lineares consumidoras.

Para esta pesquisa foi utilizado o *software* ATP (*Alternative Transients Program*) (Leuven EMTP Center, 1987) via a sua interface gráfica do ATPDraw (PRIKLER; HOIDALEN, 2002) para o estágio da modelagem computacional dos sistemas testes.

Inicialmente foi investigada a análise de ressonância modal sobre o sistema de 3 barras apresentado por Xu et al. (2005) e, posteriormente, a análise também foi aplicada ao sistema de distribuição do IEEE de 34 barras (KERSTING, 2001). Além destes dois sistemas, a análise também foi aplicada à dois sistemas de 13 barras como apresentados em Abu-Hashim et al. (1999), sendo um deles baseado no sistema de distribuição do IEEE de 13 barras, e o outro de carácter industrial. Estes dois últimos sistemas ao longo do trabalho serão descritos como de sistema de 13 barras e sistema de 13 barras industrial, respectivamente.

Após a modelagem computacional dos sistemas testes de interesse, tem-se a segunda etapa da metodologia. Nesta etapa foi realizada a identificação dos barramentos mais susceptíveis às distorções harmônicas, seguindo os estudos apresentados por Bachry e Styczynski (2002), Dzienis, Bachry e Styczynski (2005), Xu et al. (2005), Huang, Cui e Xu (2007), Cui e Wang (2012).

De posse deste estudo, na terceira etapa foram inseridas fontes harmônicas específicas, assim como descritas por Bonner et al. (1996), Abu-Hashim et al. (1999), em todos os barramentos dos sistemas de distribuição testes do IEEE 13 e 34 barras, bem como no sistema de 13 barras industrial.

Realizadas as três etapas anteriores, a pesquisa se complementou com a quarta etapa. Nesta última parte, foram investigadas as informações decorrentes das etapas anteriores buscando-se evidenciar uma MCDHT. Por esta MCDHT, procurou-se por um indicativo consistente da propagação (penetração) das distorções harmônicas totais ao longo dos sistemas de distribuição testes, com o intuito de apontar os melhores locais de instalação dos monitores de QEE, a partir da sensibilidade e observabilidade denotadas pela análise modal.

Deste modo, combinando-se os métodos analíticos da propagação das distorções harmônicas e as simulações computacionais, buscou-se mapear a propagação (penetração) das distorções harmônicas totais decorrentes da instalação de cargas não lineares específicas nos SDs considerados.

4.1 Modelagem dos Sistemas Testes

Para realizar a modelagem dos sistemas propostos (13 barras, 13 barras industrial e de 34 barras) foram necessárias algumas considerações para a aplicação da técnica da análise modal.

A primeira delas foi a de realizar o balanceamento entre as linhas dos sistemas, caso estas estivessem desbalanceadas, e utilizar para a análise modal apenas a matriz de sequência positiva, a qual será descrita na Seção 4.1.1. Sucessivamente, realizou-se o balanceamento das cargas destes sistemas sendo estas modeladas como cargas de impedância constante (Seção 4.1.2).

Estas considerações foram inicialmente realizadas para permitir a aplicação direta da análise modal à sistemas de distribuição equilibrados (balanceados), ficando para a continuidade da pesquisa o estudo investigativo para sistemas de distribuição desbalanceados.

Para a simulação dos sistemas testes via o *software* ATP, e o desenvolvimento da metodologia e manipulação dos dados via o *software* Matlab, foram aplicadas as seguintes considerações:

□ Dados utilizados via o software ATP:

Para melhor analisar os sinais de tensões obtidos via o *software* ATP, optou-se por gerar sinais com 1.024 amostras por ciclos, sendo os mesmos, posteriormente, amostrados para 256 amostras por ciclo. Esta escolha de 256 amostras por ciclo garante uma frequência de amostragem de 15.360 Hz, a qual é mais do que necessária para caracterizar as componentes harmônicas injetadas e que serão manifestadas sobre os SDs em análise.

A quantidade de ciclos gerada via o *software* ATP foi de 160 ciclos por situação analisada. Contudo, afirma-se que o número de ciclos realmente analisado pela metodologia foi de 60 ciclos. Esta escolha se baseou na resolução em frequência que será descrita no item que abordará as janelas de dados consideradas via o *software* Matlab.

□ Janelas de dados consideradas via o software Matlab:

Uma vez que a condição de ressonância harmônica pode ocorrer em qualquer ponto do espectro de frequência, inicialmente, a TRF implementada via o *software* Matlab

utilizou uma janela de 60 ciclos, resultando em uma resolução em frequência de 1 Hz, permitindo, portanto, extrair tanto as componentes harmônicas, quanto as inter-harmônicas.

Como critério de comparação, no sistema de 13 barras e 13 barras industrial, também se aplicou uma janela de 1 ciclo. Foi verificado que os valores das amplitudes das componentes harmônicas obtidas, tanto para a janela de 1 ciclo, quanto para a de 60 ciclos foram semelhantes e que, no cálculo da DHT, devido às amplitudes das componentes inter-harmônicas serem menos relevantes que as harmônicas, o valor final foi muito próximo.

Sendo assim, para o sistema de 13 barras foi utilizado um janela de 60 ciclos, caracterizando de modo mais preciso o espectro de frequência. Já para o sistema de 34 barras, devido ao maior esforço computacional, optou-se pela janela de 1 ciclo, a qual implica em uma resolução de frequência de 60 Hz.

No cálculo da DHT foram considerados os valores de frequências obtidos da janela calculada sobre o final do sinal simulado via o *software* ATP, desprezando os cem ciclos iniciais, evitando desta maneira possíveis transitórios. Esta consideração foi possível devido à distorção harmônica ser considerada um distúrbio que ocorre em regime permanente nos SEPs, resultando, após o transitório inicial, um sinal periódico.

4.1.1 Modelo das Linhas

Um alimentador trifásico de distribuição pode ser representado por uma matriz de impedância trifásica, a qual inclui as impedâncias próprias e as mútuas entre as respectivas fases. Essa matriz é obtida a partir das equações de *Carson* e pelo método de redução de *Kron* (KERSTING, 2002). Considerando-se um alimentador não transposto, sua matriz de impedância trifásica (Z_{abc}) é como apresentado em 22 :

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Em Kersting (2002), é proposto a modificação da matriz Z_{abc} de uma linha não transposta do sistema, idealizando-a como a impedância de uma linha transposta, em que as

impedâncias próprias e mútuas são iguais. A Equação 23 apresenta a impedância própria (z_p), que é definida como a média entre as impedâncias próprias de Z_{abc} :

$$z_p = \frac{1}{3}(z_{aa} + z_{bb} + z_{cc}) \quad (23)$$

Pela equação 24, tem-se a impedância mútua (z_m) como sendo a média entre as impedâncias mútuas de Z_{abc} .

$$z_m = \frac{1}{3}(z_{ab} + z_{bc} + z_{ac}) \quad (24)$$

Tais observações resultam na matriz de impedância de fases modificada (Z'_{abc}), apresentada em 25:

$$Z'_{abc} = \begin{bmatrix} z_p & z_m & z_m \\ z_m & z_p & z_m \\ z_m & z_m & z_p \end{bmatrix} \quad (25)$$

Com o intuito de evitar a complexidade do estudo quando se é considerado o desequilíbrio do SEP, aplicou-se a decomposição em componentes simétricas (FORTESCUE, 1918), que permite desmembrar um sistema polifásico desequilibrado qualquer em n sistemas monofásicos equilibrados.

Portanto, utilizando a matriz Z'_{abc} , é possível obter diretamente, através das Equações 26 e 27, as impedâncias de sequência negativa (z_{22}), positiva (z_{11}) e zero (z_{00}). Contudo, relembra-se que a impedância negativa e positiva são iguais.

$$z_{00} = z_p + 2z_m \quad (26)$$

$$z_{11} = z_{22} = z_p - z_m \quad (27)$$

4.1.2 Modelo das Cargas

Como já descrito anteriormente foi realizado o equilíbrio das cargas dos sistemas que apresentavam cargas desequilibradas. Para isto, foram considerados os valores médios das cargas. Os valores das cargas utilizados em cada sistema serão apresentados no item seguinte a esta seção.

O modelo de carga escolhido para realizar as simulações foi o modelo de impedância constante. Este modelo produz uma variação de potência proporcional ao quadrado da tensão, como mostra a Equação 28 :

$$P + jQ = \frac{V^2}{Z} \quad (28)$$

Sendo:

P : a potência ativa;

Q : a potência reativa;

V : a tensão de linha ou fase do sistema; e

Z : impedância da carga ($R+jX$).

4.1.3 Sistemas Testes

Como já descrito anteriormente, o sistema de 3 barras apresentado por Xu et al. (2005), foi utilizado inicialmente para replicar a técnica e assim permitir um melhor entendimento e confiança da utilização da análise modal aplicada à sistemas de distribuição, bem como para sistemas com um maior número de barramentos.

Os dois sistemas de 13 barras, descritos em Abu-Hashim et al. (1999), foram escolhidos devido os mesmos já serem aplicados em estudos envolvendo análises harmônicas.

O primeiro, contém a mesma topologia do sistema do IEEE de 13 barras (KERSTING, 2001), porém, com algumas alterações nas configurações das linhas e nas cargas instaladas, estas com características harmônicas. No trabalho reportado por Abu-Hashim et al. (1999), este sistema é referenciado como *Test System No.2*. Nesta pesquisa, este será simplesmente apresentado como sistema de 13 barras.

O segundo sistema já é um sistema de distribuição com perfil industrial e, diferentemente do anterior, é um sistema equilibrado. A única desvantagem deste sistema é que os valores das capacitâncias das linhas não são apresentadas. O porque isto acaba se tornando uma desvantagem será justificado posteriormente. Em Abu-Hashim et al. (1999) este sistema é apresentando como *Test System No.3*. Já neste trabalho, o mesmo será referenciado como sistema de 13 barras industrial.

A grande vantagem para o uso destes dois sistemas é que os trabalhos associados apresentam os dados das fontes de distorção harmônica aplicadas, facilitando a modelagem das mesmas. Estas serão apresentadas na Seção 4.3.1.

E por fim, foi utilizado o sistema do IEEE de 34 barras (KERSTING, 2001). Esta aplicação foi realizada com o objetivo de certificar que a metodologia como aplicada nos outros dois sistemas menores, poderia também ser implementada em um sistema com um número maior de barramentos. Para o momento, limitou-se a um sistema de distribuição de 34 barras.

Nas seções que seguem serão abordadas todas as considerações realizadas sobre os sistemas testes para uma melhor aplicação e interpretação da análise modal.

4.1.3.1 Sistema de 3 Barras

O sistema de 3 barras utilizado como base para os estudos iniciais da pesquisa é o mesmo encontrado em Xu et al. (2005) e ilustrado na Figura 12.

Como os testes sobre este sistema tiveram apenas como objetivo a reaplicação da análise modal, apenas a matriz de admitância foi modelada.

Figura 12 – Sistema de 3 barras.

Fonte: Adaptado de Xu et al. (2005)

4.1.3.2 Sistema de 13 barras

Como apresentado por Abu-Hashim et al. (1999), este sistema é baseado no sistema de distribuição radial do IEEE de 13 barras (KERSTING, 1991). A diferença do sistema apresentado neste trabalho para o que está reportado em Abu-Hashim et al. (1999) é que este sistema teste sofreu o balanceamento das linhas e das cargas.

Como este sistema possui ramais trifásicos, bifásicos e monofásicos, foram considerados apenas os seus ramais trifásicos, com o objetivo de melhor analisar a aplicação da metodologia proposta.

Por este sistema ser o primeiro sistema teste a ser implementado foram feitas algumas adaptações no mesmo para verificar o comportamento da análise modal e da ressonância harmônica.

Conforme já descrito, a ressonância harmônica está relacionada com a iteração dos bancos de capacitores com o sistema. E como em sistemas de distribuições convencionais, geralmente, o comprimento dos alimentadores principais pode ser relativamente grande, necessitando da inserção de mais bancos de capacitores ao longo do sistema para manter o nível de tensão desejado, ou até mesmo para a correção do fator de potência junto as cargas, foram propostas duas topologias para este sistema, estas com o objetivo de observar as iterações destes bancos com o sistema, e se as mesmas trariam mudanças significativas nos resultados.

A primeira topologia é a que apresenta apenas um banco de capacitor no sistema, seguindo os dados originais como os apresentados em Abu-Hashim et al. (1999). Esta será descrita ao longo do trabalho como sistema de 13 barras concentrado.

Já na segunda topologia, foi realizada a correção do fator de potência individual das cargas instaladas ao longo do sistema. Esta correção teve o objetivo de corrigir o fator de potência das cargas para 0,92 conforme recomendado no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018). Esta será descrita ao longo deste trabalho como sistema de 13 barras individual.

Segue abaixo a descrição das duas topologias com os suas respectivas informações.

❑ Sistema de 13 barras concentrado

O sistema de 13 barras apresenta uma tensão de linha no secundário do transformador de 4,16 kV como indicado na Figura 13.

A Figura 14, mostra como este sistema foi modelado no *software* ATP via a interface gráfica do *software* ATPDraw.

A impedância de curto-circuito da fonte (Z_{cc}) é importante para a análise modal da ressonância harmônica, pois possibilitará verificar a ocorrência de alguma iteração harmônica próxima a fonte de geração.

Na Tabela 9 são apresentados os valores da impedância de curto circuito da fonte do lado de alta (115 kV) e de baixa tensão (4,19 kV) do equivalente do sistema. Como neste trabalho está sendo considerada apenas a tensão do lado de baixa tensão,

Figura 13 – Topologia do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

então foram considerados para a modelagem os valores que estão em negrito na tabela.

Tabela 9 – Impedância de curto-circuito da fonte trifásica do sistema de 13 barras.

Impedância de Curto-Circuito da Fonte						
Barra	S (MVA)	Anglo	$R_{prim.} (\Omega)$	$X_{Lprim.} (\Omega)$	$R_{sec.} (\Omega)$	$X_{Lsec.} (\Omega)$
0-1 (Zcc)	1.100	82° (atrasado)	86,3868	12,1409	0,1130	0,0159

O mesmo procedimento foi realizado na Tabela 10, na qual utilizou-se apenas da impedância do transformador que está referida para os valores de tensão de 4,16 kV (valores em negrito).

Figura 14 – Modelo do sistema de 13 barras concentrado via o *software* ATPDraw.

Tabela 10 – Impedância trifásica dos transformadores do sistema de 13 barras.

Impedância dos transformadores							
Barra	S (kVA)	$V_{primário}$ (kV) (*)	$V_{secundário}$ (kV) (*)	$R_{prim.}$ (Ω)	$X_{Lprim.}$ (Ω)	$R_{sec.}$ (Ω)	$X_{Lsec.}$ (Ω)
0-1 (Zt da Sub)	5.000	115- Δ	4,16-Y	13,225	105,8	0,0173	0,1384
3 (Zt)	500	4,16-Y	0,48-Y	0,1904	0,3461	0,0025	0,0046

(*) Tensões de Linha

Como já afirmado anteriormente foram utilizados apenas os dados de sequência positiva das linhas, conforme descrito na Tabela 11. Para manter o equilíbrio do sistema via o *software* ATP foram utilizados os mesmos valores de sequência positiva para a sequência negativa, como ilustrado na Figura 15.

Tabela 11 – Dados de sequência positiva das linhas do sistema de 13 barras já considerando os respectivos comprimentos associados.

Dados das Linhas			
Sequência Positiva			
Barra	R (Ω)	X_L (Ω)	B ($\mu\Omega$)
1-2	0,0704	0,2304	2,7372
2-3	0,0561	0,0722	0,6178
2-4	0,0705	0,2304	2,7372
4-5	0,0520	0,0393	8,9604
4-6	0,0352	0,1152	1,3686

Component: LINEPI35

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R0	Ohm/m	0.000115575
L0	Ohm/m	0.000377981
C0	μ S/m	0.004490081
R+	Ohm/m	0.000115575
L+	Ohm/m	0.000377981
C+	μ S/m	0.004490081

NODE	PHASE	NAME
In	ABC	31
Out	ABC	32

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment: 501

Lines

Length: 609.6 [m]

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 15 – Parâmetros das linhas considerados via o *software* ATPDraw para o sistema de 13 barras.

Na Tabela 12 são apresentados os dados da potência trifásica das cargas, e na Tabela 13, as informações referentes ao banco de capacitor alocado neste sistema teste.

Tabela 12 – Dados das potências trifásicas das cargas e suas respectivas impedâncias para o sistema de 13 barras.

Carga					
Barra	Carga	P (kW)	Q (kVAr)	R (Ω)	X_L (Ω)
3	1	127,89	60,54	135,32	285,8531
4	3	1153,1	653,85	15,01	26,4672
4	4	511,59	454,14	33,83	38,1063
5	2	844,14	462,27	20,50	37,4361

Tabela 13 – Dados do banco de capacitor alocado no sistema teste de 13 barras concentrado.

Banco de Capacitor					
Barra	Capacitor	Q_C (kVar)	C (F)	X_C (Ω)	B (S)
5	C	600	9,1967E-05	28,8427	0,0347

❑ Sistema 13 barras individual

O sistema de 13 barras individual, apresentado na Figura 16, apresenta as mesmas características do sistema 13 barras concentrado. A única mudança é que neste foi realizada a correção do fator de potência de todas as cargas do sistema. A Tabela 14 apresenta os valores dos respectivos bancos de capacitores utilizados para esta correção.

Figura 16 – Topologia do sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 14 – Dados trifásico dos bancos de capacitores do sistema de 13 barras individual.

Banco de Capacitores					
Barra	Capacitor	Q_C (VAr)	C (F)	X_C (Ω)	B (S)
3	C1	6.059,09	9,2873E-07	2856,1393	0,0004
4	C3	162.631,46	2,4928E-05	106,4099	0,0094
4	C4	236.203,57	3,6205E-05	73,2656	0,0136
5	C2	102.667,87	1,5737E-05	168,5591	0,0059

4.1.3.3 Sistema de 13 barras industrial

Este sistema de 13 barras industrial representa uma planta de médio porte. De acordo com Abu-Hashim et al. (1999), este foi extraído de sistemas utilizados nos cálculos e exemplos descritos no *IEEE Color Book series* (IEEE..., 1990).

Esta planta é alimentada em 69 kV e a tensão de operação do sistema é de 13,8 kV. A topologia do sistema é como a apresentada na Figura 17. Os dados do sistema estão descritos nas Tabelas 15, 16, 17, 18 e 19.

Figura 17 – Topologia do sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 15 – Impedância de curto-circuito da fonte trifásica do sistema de 13 barras industrial.

Impedância de Curto-Circuito da Fonte						
Barra	S (MVA)	X/R ratio	$R_{prim.}$ (Ω)	$X_{Lprim.}$ (Ω)	$R_{sec.}$ (Ω)	$X_{Lsec.}$ (Ω)
01:69-1 / 1	1.000	22,2	105,79922	4,765828	4,2319	0,1906

Tabela 16 – Impedância trifásica dos transformadores do sistema de 13 barras industrial.

Impedância dos transformadores							
Barra	S (kVA)	$V_{prim.}$ (kV)(*)	$V_{sec.}$ (kV)(*)	$R_{prim.}$ (Ω)	$X_{Lprim.}$ (Ω)	$R_{sec.}$ (Ω)	$X_{Lsec.}$ (Ω)
01:69-1 / 1 (Zt da Sub)	15.000	69	13,8	0,0007456	0,0126741	2,982E-05	0,0005061
2 (Zt_1)	1.500	13,8	0,48	0,0006089	0,0035989	7,367E-07	4,35E-06
3 (Zt_2)	1.250	13,8	0,48	0,000564	0,003382	6,818E-07	4,0908E-06
3 (Zt_3)	1.725	13,8	4,16	0,0004108	0,003286	3,733E-05	0,0002987
4 (Zt_4)	1.500	13,8	0,48	0,000555	0,003608	6,715E-07	4,365E-06
5 (Zt_5)	1.500	13,8	0,48	0,000531	0,003451	6,423E-07	4,175E-06
5 (Zt_6)	3.750	13,8	2,4	0,000116	0,001392	3,508E-06	4,209E-05

(*) Tensões de Linha

Tabela 17 – Dados de seqüências positiva das linhas do sistema de 13 barras industrial.

Dados das Linhas		
Seqüência Positiva		
Barra	R(Ω)	X_L (Ω)
100:UTIL-69 / 01:69-1	0,02647116	0,05637024
1-2	0,02323368	0,04627692
1-3	0,014283	0,01199772
1-4	0,02989908	0,02494764
1-5	0,02075796	0,01733004

Tabela 18 – Dados das potências trifásicas das cargas e suas respectivas impedâncias para o sistema de 13 barras industrial.

Carga					
Barra	Carga	P (kW)	Q (kW)	R (Ω)	X_L (Ω)
1	7	2.240	2.000	85,02	95,22
2	1	600	530	317,40	359,32
3	2	1.150	290	165,60	656,69
3	3	1.310	1.130	145,37	168,53
4	4	810	800	235,11	238,05
5	5	370	330	514,70	577,09
5	6	2.800	2.500	68,01	76,18

Tabela 19 – Dado trifásico do banco de capacitor do sistema de 13 barras industrial.

Banco de Capacitor					
Barra	Capacitor	Q_C (kVAr)	C (F)	X_C (Ω)	B (S)
1	C	6000	8,357222385E-05	31,74	0,031505986

4.1.3.4 Sistema do IEEE de 34 Barras

O sistema do IEEE de 34 barras é um sistema com tensão de alimentação de 24,9 kV. Possui cargas concentradas e cargas distribuídas ao longo das linhas. A inserção destas cargas distribuídas é o diferencial deste sistema para os demais até então apresentados.

A Figura 18 apresenta a topologia do sistema de 34 barras com as devidas considerações para a inserção destas cargas distribuídas. A numeração das barras que estão em azul são as barras originais do sistema do IEEE de 34 barras. As barras que estão em vermelho são as barras fictícias, as quais foram alocadas as cargas distribuídas.

Seguindo a mesma metodologia aplicada ao sistema de 13 de barras, neste sistema foram apenas utilizadas as porções trifásicas. Porém, como este sistema é bastante extenso, optou-se por caracteriza-lo a partir de um alimentador trifásico principal, deixando-o como o apresentado na Figura 18.

Quando da modelagem do sistema via o *software* ATPDraw, houve a necessidade de não utilizar apenas a impedância do transformador da subestação, e sim de um modelo de transformador do próprio *software* ATP, pois como o sistema de 34 barras é um sistema extenso, representando o transformador da subestação apenas por uma impedância, não foi possível manter a tensão nas barras mais distantes da subestação em um nível adequado. E por fim, houve também a necessidade de se modelar os reguladores de tensão como transformadores ideais, também buscando manter a tensão nas barras o mais próximo de 24,9 kV.

Os dados utilizados para a simulação do sistema do IEEE 34 de barras são como os descritos nas Tabelas 20, 21, 22, 23, e 24. Com relação aos dados das linhas, apresentados na Tabela 23, é possível verificar que só estão descritos os dois tipos de configurações de linhas existentes neste sistema. Os outros dados, como os comprimentos associados, podem ser obtidos em Kersting (2001).

Na Tabela 22, as cargas que estão acompanhadas da letra *x*, são as cargas distribuídas ao longo da linha, sendo as demais as cargas concentradas.

Para se obter o valor do banco de capacitor, apresentado na Tabela 24, foi utilizado

Figura 18 – Topologia do sistema do IEEE de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

o total dos capacitores *shunts* apresentados em Kersting (2001). Isto porque as barras onde estariam alocados os dois capacitores *shunts* originais não foram consideradas neste sistema.

Tabela 20 – Impedância de curto-circuito da fonte trifásica do sistema do IEEE de 34 barras.

Impedância de Curto-Circuito da Fonte						
Barra	S (MVA)	Anglo	$R_{prim.} (\Omega)$	$X_{Lprim.} (\Omega)$	$R_{sec.} (\Omega)$	$X_{Lsec.} (\Omega)$
0-1 (Z _{cc})	1.800	85 ° (atrasado)	30,348	2,655	3,952	0,346

Tabela 21 – Impedância trifásica dos transformadores do sistema do IEEE de 34 barras.

Impedância dos transformadores							
Barra	S (kVA)	$V_{primário}$ (kV) (*)	$V_{secundário}$ (kV) (*)	$R_{prim.}$ (Ω)	$X_{Lprim.}$ (Ω)	$R_{sec.}$ (Ω)	$X_{Lsec.}$ (Ω)
0-1 (Zt da Sub)	2.500	69- Δ	24,9-Y	9,522	76,176	1,24002	9,92016

(*) Tensões de Linha

Tabela 22 – Dados das potências trifásicas das cargas do sistema do IEEE de 34 barras.

Carga			
Barra IEEE	Barra Nova	P (kW)	Q (kW)
802x	3	55	29
808	5	16	8
816	8	169	87
816x	9	5	2
824	10	40	20
824x	11	4	2
828x	13	7	3
830	14	30	15
832	15	450	225
832x	16	15	7
834	17	947	717
834x	18	146	73
836	19	28	14
836x	20	40	20
854	23	4	2
858	24	2	1
858x	25	32	17
860	26	60	48
860x	27	82	43
840	28	27	21

Tabela 23 – Dados de sequência positiva das linhas do sistema do IEEE de 34 barras.

Sequência Positiva			
Configuração da Linha	R (Ohms/m)	X (Ohms/m)	B (microS/m)
300	0,000695792	0,000517769	0,003825108
301	0,001050161	0,000522657	0,003668854

Tabela 24 – Dado trifásico do banco de capacitor do sistema do IEEE de 34 barras.

Banco de Capacitor					
Barra	Capacitor	Q_C (KVar)	C (F)	X_C (Ω)	B (S)
834 (17)	C	750	3,208717260E-06	826,68	0,001209658

4.2 Identificação dos Barramentos mais Sensíveis

Depois da modelagem dos sistemas testes, tem-se a identificação dos barramentos mais sensíveis dos mesmos.

A metodologia proposta neste trabalho para esta finalidade é a AMRH, que foi descrita com mais detalhes no Capítulo 3. A aplicação desta metodologia é o grande desafio e inovação desta pesquisa, pois a mesma foi inicialmente apresentada para estudos envolvendo a ressonância harmônica em sistemas de transmissão, e neste trabalho, a finalidade será a identificação dos barramentos sensíveis quando expostos à uma fonte harmônica em sistemas de distribuição.

Para melhor descrever e entender a AMRH, a Figura 19 apresenta os passos que devem ser realizados para se obter a barra mais sensível e observável frente a situação de ressonância harmônica.

Vale comentar que na prática as fontes das distorções harmônicas poderão ser caracterizadas por componentes quaisquer (como, por exemplo pela 3ª, 5ª e 7ª ordem), e não necessariamente estas ordens entrarão em ressonância no SEP. Desta maneira, o FP será obtido para uma gama de frequências desejáveis. Sendo assim, tem-se a possibilidade de caracterizar as barras sensíveis de um SEP não somente para as frequências que poderão entrar em ressonância, e sim para qualquer frequência que se queira analisar.

Esta utilização do FPs para frequências que não causem a ressonância é uma das contribuições desta pesquisa, pois não foi observado na literatura correlata, até o momento, nada neste sentido, como abordado no Capítulo 3.

Para realizar a implementação da AMRH é necessário obter a matriz de admitância (Y) do sistema para a gama de frequência que se queira analisar (Y_f). A obtenção da matriz de admitância necessária será descrita em detalhes na Seção 4.2.1.

De posse da Y_f é possível obter os seus respectivos autovalores e autovetores. Nesta pesquisa optou-se por utilizar o método das potências como ferramenta para obtê-los. A implementação desta ferramenta será apresentada na Seção 4.2.2.

Figura 19 – As principais etapas para a implementação da AMRH.

Depois de calcular os autovalores e autovetores é possível então obter dois parâmetros importantes da técnica, a impedância modal Z_m e o FP. Como já descrito anteriormente, a (Z_m) fornece a frequência que o sistema entra em ressonância e o FP as barras mais sensíveis e observáveis para estas frequências e para as demais analisadas. Os conceitos matemáticos utilizados para o cálculo da Z_m e do FP já foram descritos no Capítulo 3.

Na AMRH optou-se por analisar os sistemas testes até a frequência de 7.680 Hz. Esta escolha se baseou na quantidade de 256 amostras por ciclo de alguns dos medidores de qualidade da energia atuais.

4.2.1 Matriz de Admitância Nodal

A construção da matriz de admitância nodal seguiu os passos estabelecidos por Monticelli (1983), onde é descrito que a matriz ($Y = G + jB$) é composta pelas matrizes de condutância nodal (G) e susceptância nodal (B).

Com a finalidade de melhor representar o sistema, as cargas também foram consideradas na matriz de admitância do sistema, sendo a mesma adicionada na diagonal principal (Equação 31).

A Equação 29 apresenta como se consideram os valores da matriz de admitância nodal fora da diagonal principal. Já a Equação 30 apresenta o cálculo para os valores da diagonal

principal de acordo com Monticelli (1983).

$$Y_{km} = Y_{mk} = -y_{km} \quad (29)$$

$$Y_{kk} = jb_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{sh} + y_{km}) \quad (30)$$

Sendo:

b_k^{sh} a susceptância *shunt* da barra k ;

b_{km}^{sh} a susceptância *shunt* no ramo $k-m$; e

y_{km} a admitância entre os ramos $k-m$.

Adicionando a carga na diagonal principal, a Equação 30 fica de acordo com a Equação 31.

$$Y_{kk} = jb_k^{sh} + y_k^c + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{sh} + y_{km}) \quad (31)$$

Sendo y_k^c o valor da admitância da carga k .

4.2.2 Método das Potências

Para a determinação numérica dos autovalores e autovetores críticos, Xu et al. (2005) apontam o Método das Potências (FRANCO, 2008) como sendo a ferramenta adequada, o qual também será utilizado nesta pesquisa como referência. O método das potências se apresenta adequado para o contexto, uma vez que para cada frequência analisada, este fornecerá de imediato o autovalor e o respectivo autovetor crítico relacionados à matriz de admitância do sistema, isto é, aos modos de ressonância presente.

O método das potências consiste em determinar o autovalor de maior valor absoluto de uma matriz e o seu autovetor correspondente. O método é útil na prática, desde que se tenha interesse em determinar apenas o autovalor de maior módulo e os autovetores correspondentes sejam linearmente independentes (FRANCO, 2008). Como este método tem o objetivo de determinar o autovalor de maior valor absoluto, e para a AMRH é necessário obter o menor autovalor em módulo, foi realizada a inversão da matriz de admitância antes da aplicação do método das potências.

O método das potências se baseia no seguinte teorema (FRANCO, 2008):

Teorema 4.1 *Seja A uma matriz real de ordem n e sejam $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ seus autovalores e $u_1, u_2, \dots, u_n$ seus correspondentes autovetores. Suponha que os autovetores são linearmente independentes, e que:*

$$|\lambda_1| > |\lambda_2| \geq \dots \geq |\lambda_n|$$

Seja a sequência y_k definida por:

$$y_{k+1} = Ay_k, \quad k=0,1,2,3 \dots,$$

sendo y_0 um vetor arbitrário, que permite a expansão:

$$y_0 = \sum_{j=1}^n c_j u_j$$

e c_j são escalares quaisquer e $c_1 \neq 0$, então:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{(y_{k+1})_r}{(y_k)_r} = \lambda_1$$

onde o índice r indica a r -ésima componente. Além disso, quando $k \rightarrow \infty$, y_k tende ao autovetor correspondente a λ_1 .

Para a melhor compreensão da implementação do Teorema 4.1, segue abaixo um exemplo deste aplicado em uma matriz qualquer (Adaptado de Franco (2008)).

Exemplo 1 *Usando o método das potências determine o autovalor de maior valor absoluto da matriz A , com precisão de 10^{-2} :*

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 4 & 2 & 5 \end{bmatrix}$$

Solução: Tomemos $y_0 = (1, 1, 1)^t$. Temos:

$$z_0 = Ay_0 = \begin{bmatrix} 4 \\ 5 \\ 11 \end{bmatrix}; \quad \alpha_1 = \max |(z_1)_r| = \max(|4|, |5|, |11|) = 11$$

$$y_1 = \frac{1}{\alpha_1} z_1 = \begin{bmatrix} 0,3636 \\ 0,4545 \\ 1 \end{bmatrix} = z_2 = Ay_1 = \begin{bmatrix} 2,0909 \\ 3,2727 \\ 7,3636 \end{bmatrix}$$

Podemos então calcular uma primeira aproximação para λ_1 , usando a última equação do Teorema 4.1. Logo:

$$\lambda_1^{(1)} = \frac{(z_2)_r}{(y_1)_r} = \begin{bmatrix} 5,75 \\ 7,2 \\ 7,3636 \end{bmatrix}$$

Agora, desde que $\lambda_2 = \max(|2,0909|, |3,2727|, |7,3636|) = 7$, obtemos:

$$y_2 = \frac{1}{\alpha_2} z_2 = \begin{bmatrix} 0,2840 \\ 0,4444 \\ 1 \end{bmatrix} = z_2 = Ay_1 = \begin{bmatrix} 1,8519 \\ 3,1728 \\ 7,0247 \end{bmatrix}$$

Assim, obtemos uma nova aproximação para λ_1 , fazendo:

$$\lambda_1^{(2)} = \frac{(z_3)_r}{(y_2)_r} = \begin{bmatrix} 6,5217 \\ 7,1389 \\ 7,0247 \end{bmatrix}$$

Calculando então o erro relativo, obtemos:

$$\frac{|\lambda_1^{(2)} - \lambda_1^{(1)}|_r}{|\lambda_1^{(2)}|_r} \simeq \begin{bmatrix} 0,12 \\ 0,09 \\ 0,05 \end{bmatrix}$$

O qual possui todas as componentes maiores que 10^{-2} . Assim, devemos fazer uma nova iteração. Agora, desde que $\alpha_3 = 7,0247$, segue que:

$$y_3 = \frac{1}{\alpha_3} z_3 = \begin{bmatrix} 0,2636 \\ 0,4517 \\ 1 \end{bmatrix} = z_4 = Ay_3 = \begin{bmatrix} 1,8519 \\ 3,1728 \\ 7,0247 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1^{(2)} = \frac{(z_3)_r}{(y_2)_r} = \begin{bmatrix} 6,5217 \\ 7,1389 \\ 7,0247 \end{bmatrix}$$

Novamente, calculando o erro relativo:

$$\frac{|\lambda_1^{(2)} - \lambda_1^{(1)}|_r}{|\lambda_1^{(2)}|_r} \simeq \begin{bmatrix} 0,1183 \\ 0,004 \\ 0,013 \end{bmatrix}$$

Vemos que a segunda componente é menor que 10^{-2} . Portanto,

$$\lambda_1 \simeq 7,1389 \text{ com } \epsilon < 10^{-2} \text{ e } u_1 \simeq \begin{bmatrix} 0,2636 \\ 0,4517 \\ 1 \end{bmatrix} = y_3$$

4.3 Instalação das Fontes Harmônicas

A instalação das fonte harmônicas, que serão descritas na sequência, também foi realizada via o *software* ATPDraw, utilizando os sistemas testes modelados de acordo com as configurações já descritas nas seções anteriores.

No *software* ATPDraw foi utilizado a fonte *HFS Source* como ferramenta para se inserir o espectro de corrente da fonte harmônica desejada. Considerou-se o valor eficaz da corrente da subestação de energia como o valor base para se obter as amplitudes das fontes harmônicas inseridas nas simulações.

Adotou-se para os testes os valores de fase iguais a 0° , 120° e 240° (*HFS Source* trifásica). Ou seja, neste trabalho não foram considerados os ângulos de fase originais das fontes harmônicas conforme encontrados em Abu-Hashim et al. (1999).

4.3.1 Fontes Harmônicas

Conforme afirmado, as fontes harmônicas consideradas seguem as informações apresentadas por Abu-Hashim et al. (1999). O sistema de 13 barras neste caso, possui três tipos de fontes harmônicas específicas para o seu nível de tensão.

A Tabela 25 apresenta o espectro de corrente correspondente a instalação de um controlador de velocidade variável (ASD - *Adjustable Speed Drive*) no sistema de 13 barras. Já a Tabela 26 o espectro de corrente referente a um conjunto de lâmpadas fluorescentes, e a Tabela 27 a composição de cargas residenciais, definidas nesta pesquisa simplesmente por outras.

O de sistema de 13 barras industrial apresenta apenas um espectro de corrente (Tabela 28).

Como o sistema de 34 barras não possui uma fonte harmônica específica para o seu nível de tensão, foi então utilizada a maior magnitude da fonte harmônica do sistema de 13 barras como a fonte teste para o sistema (Tabela 29). A escolha se deu por esta

apresentar uma magnitude alta quando comparada com as demais. Esta fonte (Tabela 29) também serviu como a fonte teste deste trabalho.

Tabela 25 – Fonte harmônica representando um controlador de velocidade variável instalado no sistema de 13 barras.

Fonte: Abu-Hashim et al. (1999)

Fonte Harmônica ASD	
Ordem Harmonica	Magnitude
3	0,542
5	0,152
7	0,069
9	0,043
11	0,036
13	0,029
15	0,025
DHT_i	57,12 %

Tabela 26 – Fonte harmônica de um conjunto de lâmpadas fluorescentes instaladas no sistema de 13 barras.

Fonte: Abu-Hashim et al. (1999)

Fonte Harmônica Fluorescente	
Ordem Harmonica	Magnitude
3	0,2
5	0,107
7	0,021
9	0,014
11	0,009
13	0,006
15	0,005
DHT_i	22,85 %

Tabela 27 – Fonte harmônica da composição de cargas residenciais instaladas no sistema de 13 barras.

Fonte: Abu-Hashim et al. (1999)

Fonte Harmônica Outra	
Ordem Harmônica	Magnitude
3	0,007
4	0,095
5	0,002
6	0,083
8	0,005
DHT_i	12,65 %

Tabela 28 – Fonte harmônica do sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Abu-Hashim et al. (1999)

Fonte Harmônica (2)	
Ordem Harmonica	Magnitude
5	0,1824
7	0,119
11	0,0573
13	0,0401
17	0,0193
19	0,0139
23	0,0094
25	0,0086
29	0,0071
31	0,0062
35	0,0044
DHT_i	23,06 %

Tabela 29 – Fonte harmônica teste

Fonte Harmônica (1)	
Ordem Harmônica	Magnitude
-	0,542
DHT_i	54,20 %

4.3.2 Alocação da Fonte Harmônica via o *Software* ATP

Para realizar a inserção da fonte harmônica nos sistemas testes citados, têm-se os seguintes passos.

Primeiramente, foi analisado o sistema de 13 barras concentrado. Neste sistema foram aplicadas quatro fontes de distorção harmônica e obtidas as suas respectivas MCDHT.

Como já descrito anteriormente, a fonte harmônica (1) serviu como base para as diversas frequências que foram analisadas, como descrito na Figura 20. Então o valor de amplitude da fonte harmônica (1) foi utilizado para aplicar as frequências que fizeram o sistema entrar em ressonância (obtido pela AMRH) e para as frequências de 180 até 900 Hz. Esta última faixa de valores foi escolhida para melhor verificar o comportamento da metodologia em uma gama maior de frequências.

Já as fontes harmônicas do ASD, do conjunto de lâmpadas fluorescentes e das cargas residenciais (outras) foram utilizadas como descritas nas Tabelas 25, 26 e 27, diferentemente dos testes realizados com a fonte harmônica (1), considerando uma frequência por vez.

A diferença do sistema de 13 barras concentrado para o de 13 barras individual (Figura 21) é que houve um aumento na quantidade de frequências analisadas, indo até 3.000 Hz. Isto foi necessário, pois neste caso, o sistema entra em ressonância para uma frequência acima de 4.000 Hz.

No sistema de 13 barras industrial foi realizada a instalação da fonte harmônica utilizando a fonte harmônica (1) para as frequências bases de 180, 300 e 420 Hz, além de ter um adicional de possuir uma fonte harmônica específica para o seu nível de tensão (Fonte harmônica 2) possibilitando um maior número de análises, como mostra a Figura 22.

O sistema do IEEE de 34 barras, devido a não possuir uma fonte harmônica específica, e o mesmo acabar sendo o sistema teste para validar o método proposto, este foi avaliado somente para as frequências que levam este sistema a entrar em ressonância e as frequências bases, como descrito na Figura 23.

Figura 20 – Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema de 13 barras concentrado.

Figura 21 – Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema de 13 barras individual.

Figura 22 – Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema de 13 barras industrial.

Figura 23 – Metodologia adotada para a alocação das fontes harmônicas no sistema do IEEE de 34 barras.

4.4 Construção da MDHT e MCDHT

Após o estudo analítico do comportamento dos sistemas perante a ressonância harmônica e concluídas as simulações com as fontes harmônicas específicas, o próximo passo foi a construção da MDHT. Para a construção da MDHT e, posteriormente, da MCDHT, também foi utilizado o *software* ATPDraw, bem como para a análise dos dados o *software* Matlab.

Obteve-se a MDHT por meio dos sinais de tensões obtidos nas barras via as simulações no *software* ATP/ATPDraw. A Figura 24 ilustra a metodologia seguida.

O processo consistiu em alocar a fonte harmônica na Barra 1 e monitorar a tensão em todas as demais barras do sistema, extrair as amplitudes das componentes harmônicas contidas no sinal de tensão de cada barra por meio da TRF, e calcular a DHTT dessas barras. Depois de considerada a barra 1, altera-se para a barra 2, monitorando as tensões

Figura 24 – Sistema genérico utilizado para exemplificar o processo de obtenção da MDHT.

nas demais barras e repetindo os passos anteriormente elencados. Este processo é realizado até que a fonte harmônica seja alocada em todas as barras do sistema.

Realizado este procedimento, obtêm-se a MDHT na qual, em cada linha k será possível verificar a magnitude da penetração das distorções harmônicas para o restante das barras do sistema, dada a aplicação da fonte harmônica na barra k . A Equação 32 ilustra a forma de construção da MDHT para um sistema de distribuição qualquer de n barras.

$$MDHT = \begin{bmatrix} dht_{11} & \cdots & dht_{1n} \\ : & \ddots & : \\ dht_{n1} & \cdots & dht_{nn} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Para o processamento da informação acerca da área de propagação das distorções harmônicas no processo de alocação de medidores de QEE, a partir da MDHT, poderá então ser obtida a MCDHT (Matriz de Cobertura de Distorção Harmônica Total) na qual seus elementos assumirão valores unitários ou nulos a depender de um limiar de distorção harmônica total pré-definido. A título de exemplo, a Equação 33 mostra como poderá ser feita a atribuição dos valores binários aos elementos matriciais da MCDHT.

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1 \rightarrow dht_{i,j} > \sigma_{m\acute{a}x} \\ 0 \rightarrow \text{contr\'ario} \end{cases} \quad (33)$$

Onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ é o limiar pré-determinado de distorção harmônica total a partir do qual se queira medir a DHTT.

Para determinar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ foi realizada uma correlação linear entre a diagonal principal da MDHT e o FP corresponde na frequência a qual se deseja monitorar. Está correlação foi proposta depois de ter sido verificado que na maioria dos casos havia uma relação entre as barras que possuíam a maior distorção harmônica com as barras que apresentavam o maior FP. Por este motivo, o $\sigma_{m\acute{a}x}$ será o módulo do fator de correlação entre essas duas matrizes. Utilizou-se o módulo pois em alguns casos a correlação é negativa, ou seja, as duas matrizes possuem correlação mas a correlação entre elas é inversa. Optou-se por não despreza-las, pois mesmo sendo inversas, observa-se uma relação entre as matrizes.

Como apresentado na Figura 25, para a construção da MCDHT foi realizada a normalização da MDHT. Para tanto, tomou-se o maior valor de distorção harmônica da MDHT em estudo, e dividiu-se todos os elementos da MDHT por este valor. Dessa forma, conseguiu-se deixar a MDHT com valores entre 0 e 1, sendo possível realizar a atribuição binária de acordo com a Equação 33 e obter então a MCDHT.

Figura 25 – Metodologia utilizada para a construção da MCDHT.

Na Figura 25, $DHT_{(f)}$ é a distorção harmônica total da tensão na frequência em estudo, MV é o maior valor de $DHT_{(f)}$, $\sigma_{m\acute{a}x}$ é o limiar pré determinado de distorção

harmônica total, $|FC|$ é o fator de correlação, e DHT_n é a distorção harmônica total da tensão normalizada entre 0 e 1.

Verificou-se ao longo do estudo que a maioria dos fatores de correlação entre as duas matrizes ficaram próximos a um (caracterizando uma relação forte entre as mesmas), gerando um limiar muito conservador. Por este motivo, analisou-se então a possibilidade de uma alternativa para monitorar outros limiares partindo desse limiar obtido pela correlação.

Cabe afirmar que para o cálculo do limiar, algumas abordagens, diferentes da escolhida, inicialmente foram aplicadas. Uma das abordagens considerava duas maneiras de se proceder à normalização da MDHT.

A primeira normalização consiste em dividir a MDHT por o valor máximo de DHT estabelecido pelo PRODIST, com referência ao nível de tensão do sistema teste aplicado. Esta teria como objetivo indicar quantas vezes a DHT obtida pelo sinal de tensão havia passado do valor pré definido pelo PRODIST.

A segunda normalização seria considerar o maior valor obtido pela primeira normalização e dividir os demais pelo mesmo, fazendo com que toda a matriz ficasse com valores entre 0 e 1. O problema encontrado neste tipo de normalização foi que existe a possibilidade da DHT apresentar um valor menor do que o valor máximo da DHT estabelecido pelo PRODIST. Neste caso, quando aplicada a primeira normalização, os valores da MDHT ficariam relativamente pequenos, fazendo então que os valores, quando realizada a segunda normalização, aumentem demasiadamente, caracterizando valores máximos para a MCDHT e induzindo a uma completa cobertura.

A Figura 26 apresenta a maneira encontrada neste trabalho para realizar o monitoramento da distorção harmônica utilizando limiares diferentes. Para se obter este novo limiar, foi estabelecido que o $\sigma_{m\acute{a}x}$ seria o limiar máximo que este sistema conseguiria chegar para determinada frequência em análise. Então, aplicando uma regra de três, na qual a distorção harmônica máxima corresponde ao $\sigma_{m\acute{a}x}$, e a distorção a ser monitorada (escolhida pelo especialista) corresponde ao novo limiar, é possível estimar este novo limiar.

Como este estudo tem a finalidade de também garantir uma maior faixa de monitoramento da distorção harmônica, foi proposta uma maneira para se obter a distorção a ser monitorada (escolhida pelo especialista). É proposta a utilização do maior valor da DHT na frequência que se quer analisar, diminuindo-a de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Com

isso, foi possível estabelecer um range maior de monitoramento, e assim localizar a barra, ou as barras que melhor poderiam monitorar a DHT para os diversos limiares.

Figura 26 – Metodologia para a obtenção de novos limiares.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo a metodologia proposta e utilizada para o estudo investigativo da monitoração das distorções harmônicas foi descrita.

Esta metodologia tem como finalidade apresentar um indicativo acerca do mapeamento da propagação e/ou penetração das distorções harmônicas nos SDs testes analisados. Ou seja, neste estudo foi proposta uma metodologia para o processamento das informações, que sejam relevantes e inerentes à sensibilidade e observabilidade do SD monitorado no que diz respeito as distorções harmônicas da tensão.

Uma das contribuições deste estudo está em utilizar uma ferramenta que analisa a ressonância harmônica para, a partir desta, caracterizar a propagação da distorção harmônica.

Neste contexto, acredita-se que a metodologia apresentada poderá ser capaz de disponibilizar as concessionárias distribuidoras de energia elétrica uma ferramenta de apoio para a avaliação e planejamento de um futuro sistema de monitoramento no contexto da QEE com base nas informações supracitadas.

Resultados

Este capítulo irá apresentar os resultados obtidos sobre os sistemas de distribuição testes apresentados na seção anterior, juntamente com as suas respectivas análises e conclusões preliminares sobre a implementação da metodologia proposta neste estudo.

5.1 Sistema de 3 Barras

Como estudo inicial para esta pesquisa, foi considerado o sistema teste de 3 barras apresentado por Xu et al. (2005), o qual será comentado e aplicado ao longo desta seção. O intuito deste estudo foi permitir o primeiro contato com a técnica, e melhor compreender a sua utilização, para então, posteriormente, aplica-lá nos sistemas de distribuição testes de 13 barras, 13 barras industrial e de 34 barras. Vale também frisar que os resultados aqui apresentados, para o momento, referem-se apenas a aplicação da análise modal frente à ressonância harmônica no sistema teste inicial escolhido.

Todos os resultados apresentados nesta seção foram compilados via o ambiente do MATLAB, utilizando as funções encontradas no mesmo, e não sendo ainda aplicado o método da potência para o cálculo dos autovalores e autovetores associados.

5.1.1 Cenários Utilizados sobre o Sistema Teste de 3 Barras

Para a verificação do método e o comportamento da ressonância harmônica no sistema teste, foram propostos 5 cenários distintos conforme apresentado por Xu et al. (2005). A intenção destes cenários foi de verificar e melhor entender sobre as conclusões que os próprios autores relataram e reafirmar o potencial do método proposto para esta pesquisa.

Cada cenário será detalhadamente apresentado na sequência.

A Figura 27 retrata o *Cenário 1*, com apenas um banco de capacitor conectado na barra 1. Esta adaptação vem com intuito de verificar se existe alguma influência deste banco de capacitor instalado perto do equivalente da fonte do sistema.

A Figura 28 ilustra o *Cenário 2*, seguindo o mesmo intuito do primeiro. Contudo, o banco de capacitor está ligado na barra 3, ou seja mais distante da fonte.

Já a Figura 29 é o sistema teste como apresentado por Xu et al. (2005), o qual serviu de base para as alterações relatadas nesta seção. Este sistema apresenta dois bancos de capacitores instalados: um na barra 1, e o outro na barra 3 (*Cenário 3*).

A Figura 30 retrata o (*Cenário 4*), que também mostra dois bancos de capacitores. Contudo, em barras diferentes. Um banco de capacitor na barra 2, e o outro na 3, buscando então retratar a influência destes bancos de capacitores instalados mais distantes da fonte.

A Figura 31, segue a mesma lógica. Porém, tem-se um banco de capacitor na barra 1 e outro na 2, ou seja, a instalação dos bancos de capacitores estão mais próximos a fonte de energia (*Cenário 5*).

Figura 27 – *Cenário 1* com apenas um banco de capacitor (B1) na barra 1.

Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – *Cenário 2* com apenas um banco de capacitor (B2) na barra 3.

Fonte: Próprio Autor

Figura 29 – *Cenário 3* com um banco de capacitor (B1) na barra 1 e o outro (B2) na barra 3.

Fonte: Próprio Autor

Figura 30 – *Cenário 4* com um banco de capacitor (B1) na barra 2 e o outro (B2) na barra 3.

Fonte: Próprio Autor

Figura 31 – *Cenário 5* com um banco de capacitor (B1) na barra 1 e o outro (B2) na barra 2.

Fonte: Próprio Autor

5.1.2 Análise dos Resultados Iniciais

Para melhor discorrer sobre os resultados iniciais, esta seção está dividida em sub tópicos, nos quais serão avaliados os 5 cenários anteriormente descritos, bem como explorada a análise dos modos de ressonância.

5.1.2.1 Cenário 1

Como já descrito na seção anterior, este cenário retratou apenas um banco de capacitor próximo à fonte principal (Figura 27).

A impedância modal na Figura 32 apresenta os valores obtidos para este cenário. Neste caso, pode-se observar que está ocorrendo uma frequência de ressonância no modo 3, com um valor máximo de 50,63 p.u..

Para complementar a Figura 32, a Tabela 30 apresenta os dados dos autovalores, autovetores e FPs definidos por Xu et al. (2005). Nela pode ser observado que os autovalores são os menores valores da matriz de admitância, ou seja, são bem próximos de zero. Já para os autovetores, conclui-se que os valores obtidos para os do lado esquerdo (E) e direito (D) são bem próximos, confirmando o que já foi descrito na teoria, por isso, a barra 3, neste caso, é a barra que apresenta o maior nível de observabilidade e de sensibilidade para este cenário.

Ao se observar o FP, que segundo Xu et al. (2005) possibilita encontrar o centro de ressonância, também se obtêm algumas conclusões interessantes. Ao se instalar o banco de capacitor mais próximo à fonte principal, o sistema inteiro acaba sentido a ressonância harmônica, pois se verifica que os FPs se encontram bem próximos uns dos outros. Outro

Figura 32 – Impedância modal com as suas respectivas frequências de ressonância obtidas para o *Cenário 1*.

Fonte: Próprio Autor

aspecto importante é que o banco de capacitor está instalado na barra 1. Contudo, a barra considerada como o centro de ressonância é a barra 3. Isso provavelmente se deve a proximidade do banco de capacitor a fonte principal, indicando que esta situação pode ser sentida nas barras mais distantes da fonte principal.

Tabela 30 – Dados obtidos na simulação realizada para o *Cenário 1*.

Frequência de Ressonância (p.u.)			50,63 (MODE 3)
Autovalor crítico			0, 0000578∠−0, 0710
Autovetor crítico	D	Barra 1	$D_{31} = 0, 5769\angle -0, 2268$
		Barra 2	$D_{32} = 0, 5777\angle 1, 1400$
		Barra 3	$D_{33} = 0, 5782\angle 1, 7830$
	E	Barra 1	$E_{13} = 0, 5767\angle -2, 0100$
		Barra 2	$E_{23} = 0, 5775\angle -0, 6694$
		Barra 3	$E_{33} = 0, 5779\angle 0$
Fator de Participação		Barra 1	$FP_{13} = 0, 3326$
		Barra 2	$FP_{23} = 0, 3335$
		Barra 3	$FP_{33} = \mathbf{0, 3340}$

5.1.2.2 Cenário 2

Este cenário, apresenta as mesmas características do anterior. Contudo, o banco de capacitor está instalado mais distante da fonte principal.

A Tabela 31 apresenta os dados dos autovalores, autovetores e FPs. Verifica-se as mesmas características relatadas para o *Cenário 1* com relação aos autovetores e autovalores. Porém, ao se observar o FP, pode-se concluir que a barra 3 é o centro de ressonância, onde está instalado o banco de capacitor, e a propagação da ressonância harmônica é bem menor nas outras barras, do que o verificado para o *Cenário 1*.

Tabela 31 – Dados obtidos na simulação realizada para o *Cenário 2*.

Frequência de Ressonância (p.u.)			9,633 (MODE 3)
Autovalor crítico			0,0002113∠0,0822
Autovetor crítico	D	Barra 1	$D_{31} = 0,0321\angle 0,5968$
		Barra 2	$D_{32} = 0,4597\angle -0,1103$
		Barra 3	$D_{33} = 0,8875\angle 0,1472$
	E	Barra 1	$E_{13} = 0,0321\angle 0,7071$
		Barra 2	$E_{23} = 0,4597\angle 0,2575$
		Barra 3	$E_{33} = 0,8875\angle 0$
Fator de Participação		Barra 1	$FP_{13} = 0,0010$
		Barra 2	$FP_{23} = 0,2072$
		Barra 3	$FP_{33} = \mathbf{0,7877}$

5.1.2.3 Cenário 3

Este cenário é o mesmo apresentado por Xu et al. (2005), tendo um banco de capacitor próximo a fonte (barra 1) e o outro mais distante, na barra 3.

Observando a Tabela 32, verificam-se as mesmas características observadas para o *Cenário 1*, com relação aos autovalores e autovetores. Levando em consideração os FPs, verifica-se que as barras que entraram em ressonância harmônica foram as barras onde estão instalados os bancos de capacitores, ou seja, as barras 1 e 3.

Tabela 32 – Dados obtidos na simulação realizada para o *Cenário 3*.

Frequência de Ressonância (p.u.)			9,6 p.u. (MODE 3)	51,6 p.u. (MODE 1)
Autovalor crítico			0,0002149∠{−10,08}	0,0001462∠−10,43
Autovetores	D	Barra 1	$D_{31} = 0,03324\angle 0,5698$	$D_{11} = 0,9002\angle -0,3098$
		Barra 2	$D_{32} = 0,4605\angle 0,1463$	$D_{12} = 0,4344\angle 0,5057$
		Barra 3	$D_{33} = 0,887\angle -0,1104$	$D_{13} = 0,338\angle -179,4$
	E	Barra 1	$E_{13} = 0,0324\angle 0,6802$	$E_{11} = 0,9001\angle 0$
		Barra 2	$E_{23} = 0,4605\angle 0,2567$	$E_{21} = 0,4343\angle 0,8155$
		Barra 3	$E_{33} = 0,887\angle 0$	$E_{31} = 0,0338\angle -179,1$
Fator de Participação		Barra 1	$FP_{13} = 0,00105$	$FP_{11} = \mathbf{0,8102}$
		Barra 2	$FP_{23} = 0,2121$	$FP_{21} = 0,1886$
		Barra 3	$FP_{33} = \mathbf{0,7868}$	$FP_{31} = 0,001142$

5.1.2.4 Cenário 4

Este cenário apresenta as mesmas características do anterior, contudo os dois bancos de capacitores estão bem mais distantes da fonte principal.

Observando a Tabela 33, verificam-se as mesmas características apresentadas nos cenários anteriores, com relação aos autovalores e autovetores. Com relação ao FP, verifica-se que as barras que entraram em ressonância foram as barras nas quais estão instalados os bancos de capacitores, ou seja, as barras 2 e 3.

Tabela 33 – Dados obtidos na simulação realizada para o *Cenário 4*.

Frequência de Ressonância (p.u.)			8,35 p.u. (MODE 3)	22,22 p.u. (MODE 2)
Autovalor crítico			0,000266∠0,0600	0,000269∠−0,0479
Autovetores	D	Barra 1	$D_{31} = 0,0375∠0,5221$	$D_{21} = 0,0587∠0,2694$
		Barra 2	$D_{32} = 0,5373∠0,0054$	$D_{22} = 0,8417∠−0,0069$
		Barra 3	$D_{33} = 0,8425∠−0,0109$	$D_{23} = 0,5368∠−180$
	E	Barra 1	$E_{13} = 0,0375∠0,533$	$E_{12} = 0,0587∠0,2764$
		Barra 2	$E_{23} = 0,5373∠0,0163$	$E_{22} = 0,8417∠0$
		Barra 3	$E_{33} = 0,8425∠0$	$E_{32} = 0,5368∠−180$
Fator de Participação		Barra 1	$FP_{13} = 0,00141$	$FP_{12} = 0,00345$
		Barra 2	$FP_{23} = 0,2887$	$FP_{22} = \mathbf{0,7084}$
		Barra 3	$FP_{33} = \mathbf{0,7099}$	$FP_{32} = 0,2881$

5.1.2.5 Cenário 5

Para este cenário os dois bancos de capacitores estão próximos da fonte principal.

Para exemplificar a impedância modal quando se têm dois bancos de capacitores instalados no sistema, apresenta-se a Figura 33, pela qual se pode encontrar os dois picos que representam o acréscimo da impedância modal, e, como conclusão, quais são as respectivas frequências de ressonância .

A Tabela 34 apresenta os dados dos autovalores, autovetores e FPs. Com estes pode-se concluir que quando os bancos de capacitores estão próximos à fonte principal, o sistema teste ficará mais propenso a entrar em ressonância. Isto foi também evidenciado no Cenário 1. Observa-se também que mesmo o banco de capacitor estando localizado próximo à fonte, a barra mais distante acaba sendo sensibilizada.

5.1.2.6 Número de Modos de Ressonância

De acordo com Xu et al. (2005), a ressonância harmônica é causada pela troca de energia entre os elementos capacitivos e indutivos do sistema. Caso houvesse um elemento

Figura 33 – Impedância modal com as suas respectivas frequências de ressonância obtidas para o *Cenário 5*.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 34 – Dados obtidos na simulação realizada para o *Cenário 5*.

Frequência de Ressonância (p.u.)			13,33 p.u. (MODE 3)	52,63 p.u. (MODE 2)
Autovalor crítico			0,0001324∠−0,0573	0,0001805∠−0,0632
Autovetores	D	Barra 1	$D_{31} = 0,0527\angle 0,2898$	$D_{21} = 0,9945\angle -0,0222$
		Barra 2	$D_{32} = 0,706\angle -0,0007$	$D_{22} = 0,0742\angle 179,9$
		Barra 3	$D_{33} = 0,7063\angle 0,4031$	$D_{23} = 0,0743\angle -177,9$
	E	Barra 1	$E_{13} = 0,0527\angle -0,1133$	$E_{12} = 0,9945\angle 0$
		Barra 2	$E_{23} = 0,706\angle -0,4038$	$E_{22} = 0,0742\angle 179,9$
		Barra 3	$E_{33} = 0,7063\angle 0$	$E_{32} = 0,0743\angle -177,9$
Fator de Participação		Barra 1	$FP_{13} = 0,00277$	$FP_{12} = \mathbf{0,989}$
		Barra 2	$FP_{23} = 0,4984$	$FP_{22} = 0,0055$
		Barra 3	$FP_{33} = \mathbf{0,4989}$	$FP_{32} = 0,0055$

capacitivo, seria de se esperar um modo de ressonância, como retratado nas subseções anteriores. A questão que os autores levantam é: existem mais modos de ressonância? Ou seja, dois capacitores poderiam interagir entrando em ressonância e caracterizando um modo de ressonância comum?

Para esclarecer este ponto, Xu et al. (2005) retratam alguns exemplos. Contudo este trabalho buscará discorrer sobre esta questão com base nos cenários representados anteriormente.

Visando compreender esta questão as Figuras 34 e 35 apresentam os modos de ressonância dos *Cenários 2* e *4*, respectivamente. Lembrando que o *Cenário 2* apresenta

apenas um banco de capacitor na barra 3, e o *Cenário 4* dois bancos de capacitores, um na barra 1 e o outro na barra 3. Diante destes resultados, conclui-se, que o número de modos de ressonância é provavelmente igual ao número de bancos de capacitores físicos. Pois, a Figura 34 apresenta apenas um modo, e a Figura 35 apresenta dois modos, os quais estão destacados com um círculo em ambas as figuras.

Os efeitos da ressonância dos bancos de capacitores parecem estar desacoplados, ou seja, cada banco de capacitor contribui para um modo. Não existe um modo de ressonância comum envolvendo mais de um banco de capacitor. Desde modo fica evidenciado que, para encontrar a fonte que está causando a ressonância harmônica no sistema, é necessário localizar os bancos de capacitores instalados ao longo do sistema. Esta busca, pode ser facilmente realizada, com a ajuda dos autovetores ou com a determinação do FP apresentando por Xu et al. (2005).

Figura 34 – Formas dos modos no *Cenário 2*.

Fonte: Próprio Autor

5.2 Sistema de 13 Barras Concentrado

Como já descrito anteriormente, a partir deste sistema, aplicou-se a metodologia descrita no Capítulo 4. Por isso, primeiramente, serão descritos os resultados da AMRH e, posteriormente, os resultados obtidos pela MCDHT.

Figura 35 – Formas dos modos no Cenário 4.

Fonte: Próprio Autor

5.2.1 Resultados da AMRH

Compilando a AMRH no ambiente do *software* Matlab, obteve-se para este sistema uma frequência de ressonância de 524 Hz. Para validar o método da AMRH, utilizou-se o método da varredura em frequência (ARRILLAGA; WATSON, 2003; DAS, 2017), por ser uma ferramenta bem consolidada na literatura neste contexto.

A Figura 36 demonstra que a AMRH apresenta a mesma frequência de ressonância encontrada pelo método da varredura em frequência. A única diferença observada é que os valores encontrados das impedâncias não são os mesmos. Isto se deve à análise modal trabalhar no domínio modal, diferentemente do método da varredura em frequência. Mas caso seja do interesse voltar a impedância modal para o domínio da varredura em frequência, o trabalho apresentado por Xu et al. (2005) descreve tal procedimento, o que para esta pesquisa não foi necessário.

Em concordância com os conceitos apresentados por Xu et al. (2002) e descritos na Seção 5.1, é possível verificar que ocorreu apenas um pico de ressonância, e este foi devido à existência de apenas um banco de capacitor alocado no sistema.

É relevante frisar a semelhança de resultado entre a varredura em frequência e a AMRH. Até o momento não se encontrou material na literatura técnico-científica que demonstre tal comparação. A relação entre as duas ferramentas está nas ordens em que

Figura 36 – Comparação dos resultados obtidos na análise da frequência de ressonância pela AMRH e pelo método da varredura em frequência.

Fonte: Próprio Autor

as barras foram sensibilizadas apresentando os maiores FPs.

A Figura 37 ilustra melhor esta afirmação. Nesta, é possível observar que pelo método da varredura em frequência, a barra 5 é a que apresentou a maior impedância, e a barra que apresentou o maior FP (barra mais sensível e observável) também foi a barra 5.

Continuando a mesma análise é possível verificar que as barras 4 e 5 possuem um FP próximo, e pelo gráfico da varredura em frequência, estas barras também estão com valores de impedâncias bem próximos. Estas observações se aplicam a todas as barras do sistema teste em análise. Ou seja, a ordem de sensibilização das barras observando o FP é a mesma ordem que ocorre no método da varredura em frequência.

Figura 37 – Comparação dos resultados obtidos via o método da varredura em frequência e a AMRH.

Fonte: Próprio Autor

Cabe esclarecer que a AMRH compilada neste estudo varre o sinal de 1 em 1 Hz até a máxima frequência estimada, que no caso desta pesquisa foi de 7.680 Hz.

5.2.2 Formação e Análise das MCDHTs

Vale adiantar que para a análise dos resultados serão apresentados nesta seção apenas os dados obtidos para as frequências das fontes harmônicas que levaram o sistema à ressonância harmônica, sendo estas de 180, 300 e 420 Hz. Estas foram escolhidas por serem frequências usualmente observadas na prática, como também pelas fontes harmônicas utilizadas (regulador de velocidade variável, composição de lâmpadas fluorescentes e outras).

No **Apêndice A** será possível encontrar as MDHTs, MCDHTs e os FPs para todas frequências que foram analisadas, as quais foram anteriormente apontadas na metodologia.

Para melhor exemplificar como foi realizada a análise dos resultados que serão descritos nesta seção, a Tabela 35 apresenta os valores da DHT_t normalizados quando o sistema de 13 barras concentrado é exposto a uma fonte harmônica que possui a mesma frequência que levará o sistema à ressonância harmônica. Nas colunas desta tabela são apresentados os valores de DHT_t normalizados para cada barra quando a fonte harmônica foi instalada na mesma. Para exemplificar, na terceira coluna, tem-se os valores de DHT_t normalizados que as seis barras manifestaram quando foi considerada a fonte harmônica (1), com uma frequência de 524 Hz, instalada na barra 2.

Tabela 35 – Valores da MDHT normalizados para o sistema de 13 barras concentrado quando aplicada a fonte harmônica (1) com frequência de 524 Hz.

Barra	Localização da fonte harmônica.					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0,200793	0,158665	0,158542	0,315535	0,350432	0,315537
2	0,210619	0,288985	0,288761	0,574701	0,638261	0,574704
3	0,210615	0,288953	0,321771	0,574637	0,638191	0,574641
4	0,234732	0,589044	0,588587	0,84717	0,940864	0,847175
5	0,24003	0,655802	0,655293	0,943182	1	0,943188
6	0,234732	0,589047	0,58859	0,847175	0,94087	0,72202

Para continuidade da análise e construção da MCDHT, tem-se a necessidade de calcular a correlação entre a MDHT e o FP. Para o caso que está sendo exemplificado, utilizou-se da diagonal principal da MDHT da Tabela 35 com o FP da Figura 37.

Os valores obtidos pela correlação linear de todas as frequências analisadas para este sistema, estão descritos na Tabela 36. Nesta é possível verificar que a maioria dos valores estão bem próximos ao valor unitário, ou seja, apresentam uma boa relação entre si. Porém, as frequências de 780 e 900 Hz apresentaram uma baixa correlação. Estes resultados merecem uma melhor investigação e serão discutidos posteriormente.

Tabela 36 – Valores do $\sigma_{m\acute{a}x}$ para todas as frequências analisadas no sistema de 13 barras concentrado.

Frequência (Hz)	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
180	0,942
300	0,964
420	0,984
524	0,987
540	0,983
660	0,871
780	0,348
900	0,222
Fonte	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
ASD	0,927
Outros	0,969
Fluorescente	0,934

Aplicando o limiar de 0,987 determinado via a correlação linear ($\sigma_{m\acute{a}x}$), e seguindo a metodologia já descrita, é possível obter a MCDHT.

Continuando no exemplo, a Tabela 37 e a Figura 38 apresentam a MCDHT da Tabela 35. Na análise dos resultados das outras frequências será somente apresentada a MCDHT como demonstrada na Figura 38.

A escolha da barra que apresentará a maior sensibilidade á distorção harmônica através da MCDHT será aquela que apresentar a maior cobertura. Ou seja, a barra que apresentar a maior quantidade de uns na linha da MCDHT.

Tabela 37 – A MCDHT resultante da fonte harmônica (1) com frequência de 524 Hz (frequência de ressonância deste sistema) para o sistema de 13 barras concentrado utilizando o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0

Figura 38 – A MCDHT da fonte harmônica (1) para a frequência de 524 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado utilizando o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Portanto, conclui-se que para este limiar pré-estabelecido($\sigma_{m\acute{a}x}$) para a frequência de 524 Hz, a barra 5 proporcionará a melhor cobertura para o sistema.

Contudo, vale lembrar que a proposta da pesquisa é também analisar se a barra com o maior FP é a mesma que apresentou uma melhor cobertura para a DHT. Então, analisando novamente a Figura 37, observa-se que a barra que apresenta o maior FP é a barra 5, a mesma apontada pela MCDHT.

Outra proposta relevante deste trabalho foi analisar o FP para frequências diversas. Nos estudos encontrados na literatura correlata, estes acabam somente aplicando a AMRH apenas com a finalidade de indicar a sensibilidade da barra que entrará em ressonância harmônica.

Reaplicando a análise para a frequência de 180 Hz, apresentada na Figura 39, conclui-se que, de acordo com o FP, a barra 6 é barra mais observável e sensível para esta frequência. Já observando as linhas da MCDHT, as barras que se apresentaram como mais observáveis para o $\sigma_{m\acute{a}x}$ são as barras 5 e 6. Portanto, conclui-se que a barra indicada pelo FP acabará aparecendo também na MCDHT.

A mesma conclusão descrita para a frequência de 180 Hz, também é observada para as frequência de 300 e 420 Hz, bem como para as composições harmônicas decorrentes da

Figura 39 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

instalação do ASD e do conjunto de lâmpadas fluorescentes, como ilustram as Figuras 40, 41, 42 e 43.

Figura 40 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 300 Hz utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

Figura 41 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 420 Hz utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

Figura 42 – A MCDHT considerando como fonte harmônica o ASD e utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

Figura 43 – A MCDHT considerando como fonte harmônica o conjunto de lâmpadas fluorescentes e utilizando como limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

Para a fonte harmônica de outras composições, apresentada na Figura 44, é possível verificar que o FP não coincidiu com a barra de maior cobertura, que neste caso foi a barra 5. Isto ocorreu devido ao $\sigma_{m\acute{a}x}$ ser bastante elevado. Foi constatado que ao diminuir o valor deste limiar, a barra 6 será incorporada na MCDHT. Por este motivo, como já descrito na metodologia, tem-se a necessidade de variar este limiar, para verificar se a barra indicada pelo FP realmente será, ou não, incorporada na MCDHT.

Analisando novamente a MCDHT, apresentada no **Apêndice A** Tabela 110, para a fonte harmônica outros, é possível verificar que ao diminuir este limiar a barra 6 acaba aparecendo na MCDHT.

Outra análise importante realizada foi a de considerar os limiares de todas as fontes harmônicas simultaneamente, possibilitando uma análise de qual garantirá a maior cobertura da DHT_t . Desta maneira, será possível compará-la com os FPs de todas as frequências analisadas e verificar se o FP seria um bom indicativo para localizar a barra mais sensível e observável do sistema.

Para realizar a análise da cobertura da MCDHT para todos os limiares considerados, realizou-se a soma das matrizes binárias destes limiares, que neste caso são seis matrizes

Figura 44 – A MCDHT para a fonte harmônica definida como outros, utilizando como limiar $\sigma_{máx}$ e a média dos FP do sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

por frequência analisada, adicionando-se as das fontes harmônicas específicas. Desta maneira foram 6 matrizes por análise, visto que foram investigados seis limiares diferentes ($\sigma_{máx}$, $\sigma_{10\%}$, $\sigma_{20\%}$, $\sigma_{30\%}$, $\sigma_{40\%}$ e $\sigma_{50\%}$). Os valores utilizados destes limiares estão descritos no **Apêndice A**.

Com isso, todas as matrizes foram compiladas em uma, ou seja, somou-se todas as matrizes binárias das análises deste sistema (que no caso foram para 11 cenários), obtendo-se a Tabela 38.

Tabela 38 – A MCDHT final considerando todos os limiares das fontes harmônicas sobre o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da fonte harmônica					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	13	9	9	7	12	7
2	9	19	19	28	31	28
3	9	19	21	28	31	28
4	9	28	28	54	59	54
5	12	31	31	59	66	59
6	9	28	28	54	59	51

Observando-se a MCDHT, tem-se que a barra que apresentar os maiores valores, que

neste caso chegará no máximo de 66, será a barra que apresentará a maior observabilidade do sistema. Então, observando as linhas desta matriz (Tabela 38) é possível verificar que a barra 5 apresentou a maior observabilidade (cobertura) para este sistema.

Portanto, analisando o FP apresentado na Figura 45, juntamente com MCDHT da Tabela 38, é possível concluir que a barra apontada pelo FP acabou sendo a mesma que apresentou a maior observabilidade através da MCDHT. Ou seja, levando em consideração todas as fontes harmônicas, a barra 5 é a barra mais observável e sensível do sistema.

A Figura 45 codifica em cores os resultados apresentados na Tabela 38. Na figura, quanto mais claras as células, mais observáveis serão as barras associadas e, logicamente, quanto mais escuras, menos observáveis.

Outra consideração importante é que mesmo quando realizada a junção de todas as fontes harmônicas (Figura 45), a barra que se sobressaiu foi a barra indicada pelo FP, e que, mesmo incluindo os casos no qual o FP e a MCDHT não apresentaram correlação, os resultados não foram afetados, pois a barra mais sensível acabou sendo representada por algum dos limiares pré definidos.

Figura 45 – A MCDHT final para todos os limiares das fontes harmônicas consideradas e as médias dos FPs das frequências destas fontes para o sistema de 13 barras concentrado.

Fonte: Próprio Autor

Com foco em uma aplicação direta dos resultados, poderia ser considerada a barra que apresentou o maior FP na frequência de ressonância como a barra na qual seria alocada o futuro medidor de qualidade da energia, que neste caso seria apenas na barra 5. Assim, poderia ser verificado na Tabela 38 se a mesma apresentaria a maior cobertura.

Conclui-se, analisando a tabela, que isto seria verdade. Esta conclusão é relevante, uma vez que a MCDHT da Tabela 38 acaba considerando as frequências que não entraram em ressonância harmônica.

5.3 Sistema de 13 barras Individual

A diferença deste sistema para o anterior é que o mesmo apresenta mais bancos de capacitores instalados. Neste sentido, vários comentários e conclusões serão semelhantes e apresentadas de uma forma mais direta ao que já foi apresentado.

5.3.1 Resultados da AMRH

Na Figura 46 é possível verificar que a AMRH (gráfico da direita) apresentou as mesmas frequências de ressonância do método da varredura em frequência (gráfico da esquerda). As mesmas conclusões reportadas na Seção 5.2.1 também se encaixam neste sistema.

A única divergência é que neste caso aparecem duas frequências de ressonância harmônica, estas devido ao maior número de bancos de capacitores instalados no sistema.

O que é apresentado na Figura 46 é condicente com a pesquisa de Xu et al. (2002). No artigo, é descrito que quanto maior o número de bancos de capacitores instalados, maior a probabilidade de se ter um maior número de modos de ressonância harmônica excitado. E ainda mais, que provavelmente a quantidade de números de bancos de capacitores será a mesma quantidade de picos de ressonância harmônica. Isto já é algo que não ocorreu neste sistema. O que pode ser justificado, é em função deste sistema de 13 barras possuir um pequeno comprimento entre as linhas, e que em função desta característica topológica, pode ter ocorrido a superposição dos efeitos destes bancos de capacitores, produzindo então apenas dois picos de ressonância harmônica. Porém, também é válido lembrar que se limitou a frequência de análise, e que caso esta fosse aumentada, poderiam ser evidenciados outros picos de ressonância. Estudos complementares à esta análise deverão ser direcionados em trabalhos futuros.

Então, conclui-se que este sistema entrará em ressonância para as frequências de 601 Hz e 4.421 Hz, e que a barra 5 é a barra mais sensível a este fenômeno para as duas frequências de ressonância.

Figura 46 – Comparação entre as frequências de ressonância apresentadas pela AMRH (figura da direita) pelo método da varredura em frequência (figura da esquerda) sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

5.3.2 Formação e Análise das MCDHTs

Reaplicando a mesma análise do sistema de 13 barras concentrado serão primeiramente consideradas as duas frequências de ressonância deste sistema.

Os limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) calculados para este sistema estão descritos na Tabela 39.

Tabela 39 – Limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para todas as frequências analisadas sobre o sistema de 13 barras individual.

Frequência (Hz)	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
180	0,935
300	0,950
420	0,968
540	0,985
601	0,991
660	0,990
780	0,960
900	0,714
1000	0,156
2000	0,755
3000	0,837
4421	0,496
Fonte	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
ASD	0,930
Outros	0,955
Fluorescente	0,931

A Figura 47 apresenta a MCDHT e o FP para a frequência de 601 Hz. Nesta, é possível

verificar que analisando a frequência de 601 Hz separadamente, a MCDHT não apresenta a barra 5 como a mais observável, como está descrito no FP para esta frequência. Neste caso, a barra que apresentaria uma maior cobertura seria a barra 4. Porém, é possível observar que com relação ao FP a barra 4 apresenta um valor bem próximo ao da barra 5, e que esta é a segunda barra mais sensível deste sistema. Várias outras análises foram efetuadas sobre este caso e estão reportadas no **Apêndice B**. Destas análises, por exemplo, pode-se afirmar que, caso o limiar máximo seja reduzido, por exemplo, considerando $\sigma_{10\%}=0,89$, a barra 5 fará parte da MCDHT (Tabela 152).

Figura 47 – A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 601 Hz utilizando como limiar $\sigma_{máx}$ e o FP do sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Já para a frequência de 4.421 Hz, a Figura 48 apresenta os respectivos resultados. Para esta frequência é possível verificar que a MCDHT diverge do que é indicado pelo FP. Esta situação foi observada para as altas frequências acima da 40ª ordem. Esta ordem harmônica foi estipulada por verificar que os dados das fontes harmônicas reportadas na literatura utilizada neste trabalho fornecem espectros de no máximo este valor. Porém, é possível verificar no **Apêndice B** que para a frequência até 3.000 Hz (da Tabela 123 até a 191), os dados da MCDHT e do FP convergem. Desta maneira, infere-se que o FP não é um bom indicador da sensibilidade dos barramentos, quando se leva em consideração

a distorção harmônica para altas frequências. Entretanto, vale ressaltar a necessidade de um estudo mais aprofundado sobre esta afirmação.

Outra conclusão verificada a partir das tabelas do **Apêndice B** e também observada no sistema de 13 barras concentrado, é sobre a importância da escolha do limiar para a MCDHT, pois, a depender deste valor, a barra indicada pelo FP poderá não ser observada inicialmente, mas ao diminuir o limiar, esta barra acaba sendo retratada na MCDHT.

Figura 48 – A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 4.421 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{máx}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Tomando como referência a 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas, que podem ocorrer nos SEPs com mais frequência, bem como a composição harmônica caracterizada pelo ASD, conjunto de lâmpadas fluorescentes e outras cargas, têm-se os resultados observados e ilustrados pelas Figuras 49, 50, 51, 52, 53 e 54. Com base nestas figuras, conclui-se que para estas frequências, o FP indicou com precisão a barra mais sensível quando considerada a análise harmônica sobre o sistema.

Conclui-se também que para estas frequências a metodologia proposta apresentou um resultado relevante e condicente. Portanto, o FP pode ser apontado como uma ferramenta para indicar o barramento mais sensível e observável quando considerado o estudo harmônico do sistema. Cabe lembrar que esta conclusão também foi evidenciada para o sistema de 13 barras concentrado.

Figura 49 – A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 180 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Figura 50 – A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 300 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Figura 51 – A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 420 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Figura 52 – A MCDHT para a fonte harmônica ASD utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Figura 53 – A MCDHT para a fonte harmônica da composição fluorescente utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Figura 54 – A MCDHT para a fonte harmônica de outras cargas utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e a média dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Quando considerada a sobreposição de todas as MCDHTs dos limiares obtidos, o resultado é apresentado na Figura 55 e na Tabela 40. Como para a completa análise foram consideradas 15 fontes harmônicas e empregados seis limiares para cada uma delas, o número máximo que se poderia chegar é 90. Observa-se que de acordo com a MCDHT existem três barras que apresentam uma observabilidade considerável, as quais são as barras 4, 5 e 6 que apresentam valores acima de 60.

Agora, observando a média do FP, verifica-se que estas mesmas barras são as que apresentam os maiores FPs. Primeiro sendo a barra 5, e na sequências as barras 6 e 4. Portanto, o FP novamente se mostrou como um bom indicativo para a sensibilidade das barras.

Realizando outra análise, esta considerando uma futura alocação de medidores de qualidade da energia nas barras que entrariam em ressonância, a barra 5 seria apontada como uma boa opção. Pode-se concluir observando a MCDHT da Tabela 40 que esta seria capaz de garantir a maior cobertura para a análise da distorção harmônica total da tensão neste sistema.

Figura 55 – A MCDHT final considerando todos os limiares das fontes harmônicas específicas e as médias dos FPs sobre o sistema de 13 barras individual.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 40 – A MCDHT final considerando todos os limiares (descritos no Apêndice B) das fontes harmônicas específicas do sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da fonte harmônica					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	19	6	6	7	7	7
2	6	23	24	30	30	32
3	6	24	36	30	30	32
4	7	33	33	64	64	66
5	7	33	33	63	65	66
6	7	33	33	64	62	64

5.4 Sistema de 13 Barras Industrial

Diferente dos demais sistemas, este é um sistema de distribuição de 13 barras industrial de médio porte. As principais informações sobre o mesmo foram apresentadas em Abu-Hashim et al. (1999) tendo como base o *IEEE Color Book series* (IEEE..., 1990).

5.4.1 Resultados da AMRH

Considerando como frequência máxima o valor de 7.680 Hz, afirma-se que sobre este sistema, não se evidenciou qualquer condição de ressonância, o que pode ser constatado pela Figura 56. Por ser este um sistema industrial, acreditava-se que o mesmo poderia entrar em ressonância em frequências passíveis de ocorrência sobre os SEPs. Presume-se que isso ocorreu devido a este sistema não apresentar em seus dados originais as capacitâncias das linhas (admitâncias *shunts*). Em relação a esta admitância *shunt*, e da importância da sua consideração, serão posteriormente apresentados comentários adicionais.

Figura 56 – Comparação gráfica entre a AMRH e o método de varredura em frequência para o sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

5.4.2 Formação e Análise da MCDHTs

De maneira em geral, este sistema apresentou um comportamento não esperado, o qual pode ser observado a partir das MDHTs no **Apêndice C**. Nestas, é possível verificar que a DHT_t das barras deste sistema ficou bem abaixo de 8%, e todas com valores bem próximos. Ou seja, a caracterização da MCDHT ficou difícil de ser observada, pois devido aos valores próximos das distorções nas barras, pode ser que qualquer limiar estipulado venha a abranger o sistema como um todo.

Com relação aos valores próximos da DHT_t , pressupõe-se que isto é devido ao mesmo ser de característica industrial com as cargas fisicamente conectadas bem próximas umas das outras.

Utilizando os dados obtidos pelos FPs extraídos da AMRH e as diagonais principais das MDHTs, obteve-se os limiares utilizados para a MCDHT, como apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para o sistema de 13 barras industrial.

Frequência (Hz)	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
180	0,02
300	0,97
420	0,89
Fonte	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
Fonte Harmônica (2)	0,90

Utilizando o $\sigma_{m\acute{a}x}$ obtido para a frequência de 180 Hz é possível verificar na Figura 57 a respectiva MCDHT. Em função da proximidade entre os valores da DHT_t , tem-se a cobertura total do sistema. Contudo, mesmo assim, verifica-se que a barra indicada pelo FP, a barra 2, mostra-se como uma barra capaz de enxergar o sistema perante as distorções harmônicas.

Outra característica é que somente para esta frequência o fator de correlação foi bem baixo. Isto foi devido a MDHT apresentar uma característica bem distinta do FP. Nesta MDHT, que se encontra no **Apêndice C** na Tabela 219, é possível verificar que a DHT_t foi mais proeminente na barra 4, e que o FP indicou a barra 2 (Figura 57). Contudo, vale ressaltar que quando compilada a MCDHT (Figura 57), a barra 2 indicada pelo FP também aparece como uma opção, isto devido a escolha do limiar.

As conclusões observadas para a frequência de 180 Hz são similares para as frequências de 300 e 420 Hz, e para a fonte harmônica (2). Estas podem ser observadas, respectivamente, nas Figuras 58, 59 e 60. Porém, para estas frequências, diferentemente da frequência de 180 Hz, o fator de correlação obtido foi mais alto.

Realizando a sobreposição de todos os limiares e frequências avaliadas sobre este sistema, é possível obter a Tabela 42 e a Figura 61.

Analisando a Tabela 42, conclui-se que todas as barras deste sistema são barras que possuem uma boa observabilidade. Ou seja, qualquer local que for futuramente alocado um medidor irá garantir a observabilidade total do sistema considerando os limiares e as diversas características harmônicas.

Contudo, observando a média dos FPs destas respectivas fontes harmônicas é possível concluir que a melhor barra para a alocação seria a barra 2. Então, com base nas conclusões obtidas pela MCDHT final, fica evidente que o FP pode sim ser um bom indicador de um possível local para futuramente alocar medidores sensíveis a DHT.

Figura 57 – A MCDHT para a fonte harmônica na frequência de 180 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

Figura 58 – A MCDHT para a fonte harmônica para a frequência de 300 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

Figura 59 – A MCDHT para a fonte harmônica para a frequência de 420 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

Figura 60 – A MCDHT para a fonte harmônica (2) utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

Figura 61 – A MCDHT final considerando todos os limiares das fontes harmônicas específicas e as médias dos FPs sobre o sistema de 13 barras industrial.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 42 – A MCDHT final considerando todos os limiares (descritos no **Apêndice C**) das fontes harmônicas específicas sobre o sistema de 13 barras industrial.

Barra	Localização da FH				
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
1	24	24	24	24	24
2	24	24	24	24	24
3	24	24	24	24	24
4	24	24	24	24	24
5	24	24	24	24	24

5.5 Sistema de 34 barras

A simulação e análise deste sistema têm como finalidade reafirmar o potencial da metodologia proposta nesta pesquisa sobre um sistema com um número maior de barras. Por este motivo, esta seção apresentará um número menor de análises, em contrapartida ao aumento do número de barras. Somando-se a sequência de informações das seções anteriores, os problemas enfrentados sobre esta nova topologia também serão reportados na sequência.

5.5.1 Resultados da AMRH

Este sistema, diferentemente dos outros, levou em consideração para a sua simulação, o modelo mais adequado para linhas longas, conforme apresentado em Xu (2001). Na pesquisa, os autores afirmam que para estudos da ressonância harmônica em SEPs com tensões acima de 10 kV, não se devem ignorar as admitâncias *shunts* para os cabos com mais de 200 metros, e linhas longas acima de 1.000 metros. Isto porque a admitância *shunt*, embora pequena na frequência fundamental, pode se tornar bastante significativa em altas frequências. Devido a isto, e para melhor entender as condições que podem levar o sistema à ressonância harmônica, os autores afirmam que em sistemas com estas características é importante levar em consideração o efeito das linhas longas na AMRH. Neste sentido, é conveniente utilizar o modelo de circuito equivalente π para simular as linhas. Sugere-se para maiores detalhes o acesso ao trabalho reportado por Xu (2001).

Vale relembrar que os sistemas de 13 barras anteriormente empregados não necessitaram desta modelagem considerando o modelo de circuito π exato, pois como descrito, esta é indicada para sistemas com tensões acima de 10 kV, e para estes casos, a tensão era de 4,6 kV. Já para o sistema de 13 barras industrial, como a tensão de fornecimento era de 13,8 kV, talvez esta não observância da melhor representação do sistema, possa ter influenciado nos resultados encontrados.

Aplicando a AMRH e o método da varredura em frequência sobre o sistema de 34 barras, foi possível identificar 4 frequências que podem levar o sistema à ressonância harmônica. As frequências de 298, 1.905, 4.193 e 6.504 Hz. Estas compõem a Figura 62.

Compilando a AMRH via o *software* Matlab e observando a resposta gráfica do método da varredura em frequência (62), é possível verificar que para a frequência de 298 Hz, a barra mais sensível foi a barra 12 (numeração antiga da barra 17), para a frequência de 1.905 Hz foi a barra 5 (numeração antiga da barra 6), para a frequência de 4.193 Hz a barra 13 (barra fictícia), e para a última frequência de 6.504 Hz, a barra 3 (numeração real da barra).

5.5.2 Formação e Análise da MCDHT

Como neste sistema foram consideradas barras fictícias para a alocação das cargas distribuídas (Seção 4.1.3.4), e estas foram consideradas como barras na matriz de admitância do sistema, conseqüentemente, apresentaram FPs respectivos. Porém, quando alocada a

Figura 62 – Comparação gráfica das frequências de ressonância evidenciadas via a AMRH e o método da varredura em frequência sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

fonte harmônica via o *software* ATP, estas barras não foram as consideradas, pois na prática, estas não existem. Sendo assim, houve a necessidade de criar uma nova numeração para as barras, como apresentada na Figura 63. A numeração dentro do círculo, é a nova e a que será considerada nas MCDHTs desta seção e no **Apêndice D**. Vale frisar que este apêndice contém todas as demais tabelas e figuras geradas sobre o sistema de 34 barras em análise.

Outra observação importante é em relação aos valores dos FPs que as barras fictícias poderão gerar. Como estas não existem na prática, avaliou-se então as duas barras próximas e com FPs altos. A barra mais próxima e com o maior valor, foi então apontada como a responsável pela excitação da ressonância harmônica.

Nas tabelas que seguem reportando os FPs, caso algum valor da coluna indicando as numerações das barras apresente-se em branco, isto significará que aquela barra é uma barra fictícia, e que o seu valor não foi considerado na análise.

Figura 63 – Topologia do sistema de 34 barras com a nova numeração das barras.

Para a formação das MCDHTs foram obtidos os seguintes limiares (Tabela 43) para as respectivas frequências analisadas.

Tabela 43 – Limiares máximos ($\sigma_{m\acute{a}x}$) para o sistema de 34 barras.

Frequência (Hz)	Limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$
180	1,00
298	0,99
300	0,99
420	0,96
1905	0,70
4193	0,39
6501	0,33

Aplicando então o $\sigma_{m\acute{a}x}$ para frequência de 180 Hz é possível verificar que a MCDHT (Figura 64) se restringe apenas a barra 19. Ao diminuí-lo, como apresentado no **Apêndice D** (Figura 78 até a 82), é possível verificar uma maior cobertura deste sistema para a mesma. Observando os dados dos FPs, descritos na Figura 64 para esta frequência, é

possível verificar que a barra 13 e a barra 19 são as barras mais sensíveis e observáveis do sistema. Portanto, para esta frequência o FP consegue ser um bom indicativo para barra que seria a mais sensível à propagação da distorção harmônica da tensão.

Vale ressaltar que entre a barra 13 e 14 existe um barra com o FP igual a 1, ou seja, indicando uma possível ressonância. Porém, esta barra é fictícia, não podendo ser levada em consideração.

Figura 64 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz, utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Já para a frequência de 300 Hz (Figura 65), é possível verificar que para o limiar máximo ($\sigma_{m\acute{a}x}$), a barra indicada pelo FP não é a que apareceu na MCDHT. Porém, ao diminuir o limiar associado, como está apresentado no **Apêndice D** (Figura 89), esta acaba sendo incorporada à MCDHT.

Isto mostra que a escolha do limiar é algo importante para a análise da distorção harmônica, sendo que esta pesquisa apresentou apenas uma proposta para a sua determinação.

Para a frequência de 420 Hz, o FP foi novamente um bom indicativo para a observação da barra mais sensível à distorção harmônica da tensão para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$, como ilustra a Figura 66. Outra observação é que a região de cobertura apresentada na MCDHT, coincide com os maiores valores obtidos pelos FPs.

Levando em consideração as frequências que fazem este sistema entrar em ressonância harmônica, conclui-se que para a frequência de 298 Hz (Figura 67), o sistema apresentou a mesma característica reportada para a frequência de 300 Hz. Já para a frequência de 1.905 Hz (Figura 68), a barra estimada pelo FP acaba aparecendo na MCDHT, mas não garantindo a maior observabilidade do sistema. Porém, para este limiar, a barra 4 apresentou uma cobertura quase total de todo o sistema para esta frequência, com um FP de 0,915. Ou seja, bem próximo ao valor unitário. Mas vale ressaltar que diminuindo este limiar, a barra indicada pelo FP acaba apresentando uma cobertura total para o sistema.

Agora analisando as frequências de 4.193 Hz e a de 6.501 Hz, é possível verificar as mesmas condições reportadas para os sistemas que entraram em ressonância para as altas frequências.

No caso da frequência de 4.193 Hz (Figura 69), a barra que apresentou o maior FP foi uma barra fictícia, e por isso, analisando as barras ao lado desta, é possível concluir que a barra 10 apresenta um maior FP do que a barra 9. Por este motivo, a barra 10 foi neste caso considerada a barra que poderá levar o sistema à ressonância harmônica para esta frequência. Vale ressaltar que na MCDHT obtida para esta frequência, a barra indicada pelo FP (barra 10) foi uma das barras que garantiu a cobertura de todas as barras do sistema.

Já para a frequência de 6.501 Hz (Figura 70), o FP não foi um bom indicativo para se estimar qual barra seria mais sensível à distorção harmônica. É possível verificar pelo FP que as barras mais distantes da subestação são as que apresentaram o menor FP. Já pela MCDHT, a região que apresentou uma melhor cobertura foi esta região (englobando as barras mais distantes da subestação). Porém, cabe ressaltar que como foi observado nos outros sistemas, no caso de altas frequências, o FP não se apresentou como um bom indicativo para a determinação das barras mais sensíveis e observáveis do sistema.

Figura 65 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 300 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Figura 66 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 420 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Figura 67 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 298 Hz, utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Figura 68 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 1.905 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Figura 69 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 4.193 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Figura 70 – A MCDHT para fonte harmônica (1) na frequência de 6.501 Hz utilizando como limiar o $\sigma_{m\acute{a}x}$ e o FP sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Realizando a sobreposição de todas as frequências analisadas e seus respectivos limiares para este sistema teste, obteve-se a Figura 71 e Tabela 44. O número máximo que se pode chegar em função da sobreposição destas tabela é 42, ou seja, a linha da tabela que se aproximar deste valor, indicará a barra que possui a maior observabilidade à distorção harmônica total da tensão, quando consideradas as diversas frequências analisadas.

Observando o FP (Figura 71), conclui-se que as barras 12 e 18 são as que apresentaram a maior sensibilidade e observabilidade, quando obtido a média de cada frequência analisada.

Reaplicando a análise na MCDHT (Tabela 44), diferente do FP, as barras que apresentaram a maior observabilidade foram as barras 13 e 19. Porém, estas barras apresentam FPs bem próximos aos das barras 12 e 18. Enquanto, a barra 12 e 15 apresentam um FP igual a 0,571, a 13 e a 19 apresentam um FP igual 0,570. Ressalta-se assim que as barras indicadas pelo FP não apresentaram uma observabilidade ruim. Deste modo elas ainda podem ser consideradas como barras observáveis.

Agora, suponha, por exemplo, que os medidores de qualidade da energia sejam alocados apenas nas barras que entrariam em ressonância harmônica, ou seja, nas barras 12, 5, 10 e 3. Conclui-se que, a barra 12 é a barra com a maior observabilidade com relação a estas barras, porém, quando se observa a barra 10, esta acaba melhorando a observabilidade do sistema, pois acaba observando melhor do que a barra 12 e as barras próximas à subestação. A mesma conclusão é observada pela barra 5. Esta ainda é bem mais observável que a barra 10 próxima a subestação. Com isso é possível verificar que somente esses três monitores seriam necessários para monitorar o sistema por completo. Não sendo necessário desta forma a alocação na barra 3, pois como é visto na Tabela 44, a barra 3 não apresenta uma observabilidade melhor do que as outras barras supracitadas.

Vale ressaltar que neste caso a barra 13 é bem melhor do que a barra 12. Porém, com a proposta de se adotar outros locais propícios para a medição, as zonas não observáveis da barra 12 acabam sendo contempladas quando considerado outro ponto de medição.

Além do mais, fica evidente que mesmo não se observando diretamente na MCDHT a barra indicada pelo FP, a aplicação desta metodologia, juntamente a um processo de otimização com a finalidade da alocação de medidores sensíveis a distorção harmônica é viável e pode apresentar resultados importantes para a área.

Figura 71 – A MCDHT final considerando todos os limiares para as fontes harmônicas específicas e as médias dos FPs sobre o sistema de 34 barras.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 44 – A MCDHT final considerando todos os limiares (descritos no **Apêndice D**) sobre o sistema de 34 barras.

Bus	Localização da fonte harmônica.																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	15	16	17	18	18	12	13	13	14	16	12	13	13	13	12	16	13	13	13
2	16	16	17	18	18	12	13	13	14	16	12	13	13	13	12	16	13	13	13
3	17	17	17	18	18	12	14	13	14	17	12	13	13	14	12	17	13	13	13
4	18	18	18	19	18	13	13	13	13	17	11	10	10	13	9	17	10	10	10
5	18	18	18	19	25	18	20	20	21	22	15	17	17	20	14	22	17	17	17
6	14	14	14	13	20	19	21	21	22	23	18	19	19	21	18	23	18	19	19
7	14	14	14	13	20	18	21	21	22	24	18	19	19	21	18	23	19	19	19
8	15	15	15	13	20	19	21	24	24	25	21	21	22	21	20	25	21	22	22
9	16	16	15	13	21	20	22	24	24	25	21	21	22	22	20	25	22	22	22
10	17	17	17	17	24	23	26	26	26	27	20	21	21	26	17	27	20	21	21
11	14	14	14	11	18	18	21	23	23	20	32	32	32	21	32	20	32	32	32
12	15	15	15	12	19	19	22	24	24	21	32	33	33	22	32	21	33	33	33
13	15	15	16	12	21	19	23	24	24	22	32	33	36	23	32	21	33	34	36
14	14	14	14	13	20	19	21	21	22	23	18	19	19	21	18	23	18	19	19
15	14	14	14	11	18	18	21	23	23	20	32	32	32	21	32	20	32	32	32
16	17	17	17	17	24	23	26	26	26	27	20	20	21	26	17	27	20	21	21
17	14	14	14	12	19	18	22	23	23	20	32	33	33	22	32	20	33	33	33
18	15	15	16	12	20	19	23	24	24	21	32	33	34	23	32	21	33	34	34
19	15	15	16	12	21	19	23	24	24	22	32	33	36	23	32	21	33	34	37

5.5.3 Problemas Encontrados na Análise do Sistema de 34 Barras

Vale afirmar que para a realização das simulações do sistema de 34 barras foram consideradas primeiramente outras maneiras de se modelar este sistema.

Inicialmente, a proposta foi de considerar todos os ramais trifásicos deste sistema, como apresentado na Figura 72. Para este sistema, também foi proposta a criação de barras fictícias, as quais estariam alocadas as cargas distribuídas, estas descritas em vermelho na Figura 72.

Figura 72 – Sistema de 34 barras considerando todos os ramais trifásicos.

Porém, ao implementar a AMRH deste sistema via o *software* Matlab, verificou-se um problema: o método das potências não conseguia estimar com precisão os autovalores e autovetores deste sistema. Isto devido a matriz deste sistema ser muito esparsa, problema este usualmente encontrado em sistemas de distribuição radiais.

Para entender melhor a complexidade do problema foi aplicado então o método de varredura em frequência, sendo o resultado representado pela Figura 73. Verificou-se que este sistema entraria em ressonância para as frequências de 270, 514, 1.345, 2.792, 4.332 e 5.936 Hz.

Figura 73 – Varredura em frequência do sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.

Já aplicando o método das potências, o qual foi aplicado em todos os outros sistemas estudados, só foi possível localizar as frequências de 514 e de 5.936 Hz, representadas na Figura 74. Ou seja, os autovalores e autovetores estimados para este sistema não compreenderiam todas as informações necessárias para garantir a fidelidade dos dados. Por este motivo a utilização do método da varredura em frequência foi útil, pois mostrou-se como uma ótima ferramenta para averiguar se a AMRH estava respondendo corretamente.

Outra solução testada foi utilizar o método da potência inversa com deslocamento para a estimação dos autovalores e autovetores. Este se apresentou bem melhor do que o anterior, porém, ainda não conseguiu indicar todas as frequências que levariam o sistema a entrar em ressonância harmônica. A Figura 75 mostra que este método localizou as frequências de 270, 1.345, 2.792, 4.332 e 5.932 Hz, não localizando somente a frequência de 514 Hz.

A última alternativa foi aplicar a função *eig* incorporada ao *software* Matlab a qual determina os autovalores e autovetores baseando-se no método Francis (FRANCO, 2008) para esta estimação. Como ilustrado pela Figura 76, este método conseguiu localizar todas as frequências estimadas pelo método da varredura em frequência. Contudo, verifica-se na figura ao lado direito que o método apresenta falhas, ou seja, não consegue obter uma continuidade na sua resposta como os outros métodos. Acredita-se que isto pode ser devido a algum erro numérico desta função. Outro problema que não o tornou totalmente viável a este estudo, é que foi verificado uma intercalação dos modos de ressonância,

difícultando a identificação do modo que entrou em ressonância. Ou seja, como havia esta intercalação dos modos, não foi possível garantir que o modo apresentado era o modo correto que estava entrando em ressonância, conseqüentemente, prejudicando a análise dos FPs.

Por este motivo, optou-se por simplificar o sistema de 34 barras e deixá-lo conforme foi apresentado na metodologia deste trabalho.

Figura 74 – Método das Potências aplicado ao sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.

Figura 75 – Método da potência inversa com deslocamento do sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.

Figura 76 – Função *eig* do Matlab aplicada ao sistema de 34 barras considerando o ramal trifásico completo.

Considerações Finais

Como descrito anteriormente, o objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver um estudo investigativo da AMRH aplicada a SDs frente às distorções harmônicas, no contexto da QEE. Para tanto, apresentou-se uma metodologia cuja finalidade foi evidenciar a sensibilidade e a observabilidade dos SDs perante a presença da ressonância harmônica, utilizando a AMRH, e também a propagação das distorções harmônicas nos sistemas testes avaliados.

Esta proposta ao longo do seu desenvolvimento se mostrou um pouco ousada, pois como apresentada, é composta por duas frentes de pesquisa distintas. De um lado se analisa a sensibilidade e a observabilidade do sistema utilizando um método onde o foco inicial é a obtenção de dados que levam o sistema à ressonância harmônica, e do outro, a análise da propagação da distorção harmônica da tensão.

A escolha da AMRH para a caracterização da sensibilidade e observabilidade dos SDs foi justificada pela definição e emprego do FP. Contudo, o que foi encontrado até o momento na literatura correlata, é que o FP é utilizado apenas para a caracterização da sensibilidade e observabilidade das frequências perante a ressonância harmônica. Sendo assim, este trabalho apresentou uma nova vertente para esta análise, verificada pelas análises realizadas utilizando os FPs não somente para a caracterização das frequências que levarão o sistema à ressonância harmônica, mas também para qualquer componente harmônica desejada. Ou seja, evidenciou que o FP pode ser aplicado também para a análise da propagação da distorção harmônica total da tensão, distúrbio recorrente nos SDs e associado à falta de QEE.

Vale frisar que em relação a sensibilidade e observabilidade à ressonância harmônica, a literatura correlata já apresenta vários estudos e em grande parte reportados no Capítulo

3. Porém, quando se considera a utilização do FP para a determinação da propagação diante da distorção harmônica da tensão, da maneira como consultada, não se encontrou registros na literatura técnico-científica, ainda mais com foco à SDs, denotando então uma originalidade desta pesquisa. Então, o direcionamento dado foi o de verificar sobre os SDs testes a robustez da metodologia desenvolvida.

Inicialmente, optou-se por garantir a confiabilidade do desenvolvimento e da aplicação da AMRH no sistema de 3 barras, e, posteriormente aplica-la sobre os outros sistemas de distribuição testes (13 barras, 13 barras industrial e 34 barras).

Acerca da propagação das distorções harmônicas é importante ressaltar que para se obter a MCDHT, aplicou-se nos SDs testes uma fonte harmônica de corrente e se observou as tensões manifestadas nas barras para a construção da MCDHT. Ou seja, aplicou-se uma corrente distorcida no sistema e se analisou apenas a tensão manifestada nas barras do sistema em análise. E como pôde ser constatado pelos resultados apresentados, a distorção harmônica da tensão em muitos casos se apresentou relativamente acima das normas vigentes, como por exemplo, dos valores tomados como referência do PRODIST.

Uma conclusão decorrente foi que os FPs podem ser um bom indicativo para a análise da propagação da distorção harmônica nos SDs avaliados. Porém, atenção deve ser dada e ainda melhor avaliada para aplicações que envolvam altas frequências, como, as superiores a 2.400 Hz (40a ordem), como evidenciado nos resultados apresentados no Capítulo 5. Mas vale ressaltar que quando a MCDHT não indicou de imediato a barra indicada pelo FP, foi necessário apenas diminuir o limiar estabelecido para a construção da MCDHT de maneira a esta considerar o indicativo de barra apresentado pelo FP.

Nesta pesquisa, para a definição do limiar, foi proposta uma análise da correlação entre o FP e a MDHT compilada para a frequência em análise. Foi observado que o fator de correlação de todos os SDs aqui estudados chegaram a valores bem altos. Mostrando assim a existência de uma boa relação entre as duas análises, uma voltada para a ressonância harmônica, via o FP, e a outra para a propagação da distorção harmônica total da tensão.

Pela definição do limiar conforme apresentado, foi também possível verificar que o FP pode ser utilizado para várias frequências, não se restringindo apenas para as frequências que levam o sistema à ressonância harmônica. Como os limiares atingiram valores normalmente elevados, como já descrito, optou-se por diminui-los com o intuito de verificar a sensibilidade dos mesmos na obtenção das respectivas MCDHTs. Com esta avaliação foi possível verificar a importância do mesmo para a análise da MCDHT e quão este aumenta

a sensibilidade da análise.

Dentre os resultados interessantes deste pesquisa, vale também comentar sobre os resultados decorrentes da sobreposição de todos os limiares para as frequências analisadas sobre o SD, onde também foi possível indicar a barra sensibilizada, ou a barra próxima a esta indicada pela média dos FPs das mesmas frequências em análise.

Além dos resultados satisfatórios, também vale comentar um problema enfrentado na aplicação do método da análise modal da ressonância harmônica. O problema foi observado quando se aumentou o número de barras do sistema de distribuição teste. Como AMRH foi proposta e aplicada inicialmente para sistemas de transmissão, não se atentou que nos sistemas de distribuição predominantemente radiais, a matriz de admitância é muito mais esparsa do que em sistemas de transmissão. Por este motivo, a obtenção dos autovalores e autovetores ficou comprometida, induzindo a uma adaptação do sistema original para a aplicação da AMRH.

Para finalizar, a metodologia descrita neste trabalho possibilitou apontar um indicativo acerca do mapeamento da propagação das distorções harmônicas nos SDs testes avaliados. Neste contexto a mesma poderá ser capaz de disponibilizar a comunidade científica uma ferramenta de apoio para a avaliação e estudos da propagação das distorções harmônicas, com uma possível aplicação, por exemplo, na alocação dos medidores necessários para tornar os SDs em análise observáveis perante o problema da distorção harmônica.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

A metodologia proposta neste trabalho apresentou resultados satisfatórios, contudo, ainda não foi possível abranger todas as possibilidades para uma avaliação completa. Na sequência, são apresentadas algumas sugestões que podem servir para a continuidade desta pesquisa, definindo futuras frentes para aprimorar todo o trabalho até então desenvolvido:

- ❑ Aplicar a metodologia da AMRH em sistemas desequilibrados;
- ❑ Considerar os ângulos de fases nas respectivas fontes harmônicas como indicados em Abu-Hashim et al. (1999);
- ❑ Avaliar outras abordagens para se obter a sensibilidade das barras através do FP, como, por exemplo, pela decomposição em valores singulares (SVD - *Singular-Value Decomposition*);

- ❑ Analisar a influência das altas frequências sobre o FP;
- ❑ Aplicar a metodologia como proposta neste trabalho como suporte para alocação de medidores de QEE para o monitoramento da distorção harmônica;
- ❑ Avaliar e melhor definir os limiares relacionados à distorção harmônica; dentre outros.

Referências

ABU-HASHIM, R.; BURCH, R.; CHANG, G.; GRADY, M.; GUNTHER, E.; HALPIN, M.; HARZIADONIN, C.; LIU, Y.; MARZ, M.; ORTMEYER, T.; RAJAGOPALAN, V.; RANADE, S.; RIBEIRO, P.; SIM, T.; XU, W. Test systems for harmonics modeling and simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1999. v. 14, n. 2, p. 579–587, apr 1999. ISSN 08858977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/754106/>>.

AMORNVIPAS, C.; HOFMANN, L. Resonance analyses in transmission systems: Experience in germany. In: **IEEE PES General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2010.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 da Qualidade da Energia Elétrica**. 2018. 76 p. 9ª Revisão. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. 2ª edição. ed. [S.l.]: John Wiley & John Wiley & Sons, Ltd, 2003. ISBN 0-470-85129-5.

ARRUDA, E. F.; KAGAN, N.; RIBEIRO, P. F. Three-phase harmonic distortion state estimation algorithm based on evolutionary strategies. **Electric Power Systems Research**, 2010. Elsevier B.V., v. 80, n. 9, p. 1024–1032, 2010. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2010.01.009>>.

AYOUBI, M.; HOOSMAND, R.-A.; ESFAHANI, M. T. Optimal capacitor placement in distorted distribution systems considering resonance constraint using multi-swarm particle swarm optimisation algorithm. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2017. Institution of Engineering and Technology (IET), v. 11, n. 13, p. 3210–3221, sep 2017.

BACHRY, A.; STYCZYNSKI, Z. A method for a sensitivity analysis of the distribution system to harmonic distortion. In: **10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.02EX630)**. IEEE, 2002. v. 1, n. 1, p. 149–154. ISBN 0-7803-7671-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document-/1221424/>>.

BELLMAN, R. **Introduction to Matrix Analysis**. [S.l.]: 2, 1970.

BONNER, A.; GREBE, T.; GUNTHER, E.; HOPKINS, I.; MARZ, M. B.; MAHSEREDJIAN, J. Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques. **IEEE**

- Transactions on Power Delivery**, 1996. v. 11, n. 1, p. 452–465, 1996. ISSN 08858977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper-.htm?arnumber=484130>> <http://ieeexplore.ieee.org/document/484130/>>.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 10^a edição. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2004.
- _____. **Introdução á análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: [s.n.], 2012.
- BREDA, J. F.; VIEIRA, J. C. M.; OLESKOVICZ, M. Three-phase harmonic state estimation for distribution systems by using the SVD technique. In: **2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)**. IEEE, 2016. p. 1–5. ISBN 978-1-5090-4168-8. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7741789/>>.
- BRONZEADO, H.; RAMOS, J.; OLIVEIRA, J.; ABREU, J.; ARRUDA, A.; BRANDÃO, A. Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições associados à qualidade da energia elétrica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (SBQEE). <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081215143558-T207.PDF>, 1997.
- CARPINELLI, G.; RUSSO, A.; RUSSO, M.; VERDE, P. Inherent structure theory of networks and power system harmonics. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, 1998. v. 145, n. 2, p. 123, 1998. ISSN 13502360. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=675>.
- CPFL. **Requisitos para Conexão de Cargas Potencialmente Pertubadoras ao Sistema Elétrico da CPFL (GED-10099)**. CPFL Energia, 2012. 1–34 p. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-10099.pdf>>.
- CUI, Y.; WANG, X. Modal frequency sensitivity for power system harmonic resonance analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012. v. 27, n. 2, p. 1010–1017, 2012. ISSN 08858977.
- CUI, Y.; XU, W. Harmonic resonance mode analysis using real symmetrical nodal matrices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 22, n. 3, p. 1989–1990, jul 2007.
- CURRENCE, E.; PLIZGA, J.; NELSON, H. Harmonic resonance at a medium-sized industrial plant. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1995. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 31, n. 4, p. 682–690, 1995.
- D’ANTONA, G.; MUSCAS, C.; PEGORARO, P. A.; SULIS, S. Harmonic source estimation in distribution systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2011. v. 60, n. 10, p. 3351–3359, 2011. ISSN 00189456.
- D’ANTONA, G.; MUSCAS, C.; SULIS, S. State estimation for the localization of harmonic sources in electric distribution systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2009. v. 58, n. 5, p. 1462–1470, 2009. ISSN 00189456.
- DAS, J. **Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics, Second Edition (Power Engineering (Willis))**. [S.l.]: CRC Press, 2017. ISBN 9781138075047.

- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, B. W. **Electrical Power Systems Quality**. 3ª edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012.
- DZIENIS, C.; BACHRY, A.; STYCZYNSKI, Z. A. The influence of the distribution system structure on distortion emission and propagation. In: **2005 IEEE Russia Power Tech**. IEEE, 2005. p. 1–5. ISBN 978-5-93208-034-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4524454/>>.
- DZIENIS, C.; KOMARNICKI, P.; STYCZYNSKI, Z. A. A method for optimally localizing power quality monitoring devices in power systems. **2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proceedings**, 2007. p. 1522–1527, 2007.
- EAJAL, A. A.; EL-HAWARY, M. E. Optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distribution systems with harmonics consideration using particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2010. v. 25, n. 3, p. 1734–1741, July 2010. ISSN 0885-8977.
- EGGENSCHWILER, L.; GALLAND, O.; CHOLLET, D.; DECORVET, F.; ROGGO, D.; FAVRE-PERROD, P. Frequency scans and resonance mode analysis for resonance problems identification in power networks in presence of harmonic pollution. **CIREN - Open Access Proceedings Journal**, 2017. Institution of Engineering and Technology (IET), v. 2017, n. 1, p. 650–654, oct 2017.
- FARACH, J. E.; GRADY, W. M.; ARAPOSTATHIS, A. Optimal procedure for placing sensors and estimating the locations of harmonic sources in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1993. v. 8, n. 3, p. 1303–1310, jul 1993. ISSN 08858977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/252656/>>.
- FIGUEIREDO, A. **Análise de Modelos para Cargas perturbadoras no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2006.
- FORTES, R. **Distorções Harmônicas Produzidas por Inversores de Geração Distribuída Fotovoltáica em Condição de Ressonância Paralela**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UNESP (Campus Ilha Solteira), 2016.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers**, 1918. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 37, n. 6, p. 629–716, jun 1918.
- FRANCO, N. **Cálculo Numérico**. 1ª. ed. São Paulo: [s.n.], 2008. 505 p.
- GALLAND, O.; EGGENSCHWILER, L.; HORTA, R.; SATTINGER, W.; FAVRE-PERROD, P.; ROGGO, D. Application of resonance analysis to AC–DC networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 3, p. 1438–1447, jun 2018.
- GHAEMI, A. H.; ABYANEH, H. A.; MAZLUMI, K. Harmonic indices assessment by Wavelet Transform. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 2011. Elsevier Ltd, v. 33, n. 8, p. 1399–1409, 2011. ISSN 01420615. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.020>>.

- GOMES, D. G. S. **Alocação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica Através da Inspeção Visual para a Observação de Variações de Tensão de Curta Duração**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- GUSSOW, M. **Eletricidade Básica**. 2ª edição. ed. [S.l.]: Pearson Makron Books, 1997. ISBN 85.346.0612-9.
- HARTANA, R.; RICHARDS, G. Harmonic source monitoring and identification using neural networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1990. v. 5, n. 4, p. 1098–1104, 1990. ISSN 08858950. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/99358/>>.
- HAYT, W.; KEMMERLY, J.; DURBIN, S. **Engineering Circuit Analysis**. 8ª edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2012.
- HERNANDEZ, A.; ESPINOSA-JUAREZ, E.; De Castro, R. M.; IZZEDDINE, M. SVD applied to voltage sag state estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2013. v. 28, n. 2, p. 866–874, 2013. ISSN 08858977.
- HU, H.; SHI, Q.; HE, Z.; HE, J.; GAO, S. Potential harmonic resonance impacts of PV inverter filters on distribution systems. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 1, p. 151–161, jan 2015.
- HUANG, Z. H. Z.; CUI, Y. C. Y.; XU, W. X. W. Application of Modal Sensitivity for Power System Harmonic Resonance Analysis. **2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2007. v. 22, n. 1, p. 222–231, 2007. ISSN 1932-5517.
- IEEE. Ieee recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. **IEEE Std 519-1992 (Revision of IEEE Std 519-1981)**, 1992. 1992.
- IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis. [S.l.]: IEEE, 1990.
- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. **IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)**, 2009. p. c1–81, June 2009.
- JUNIOR, A. A. S.; SILVA, L. G.; FILHO, A. T. A. Meters allocation in distribution systems based on the load importance. **IEEE Latin America Transactions**, 2016. v. 14, n. 4, p. 1786–1791, apr 2016. ISSN 1548-0992. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7483516/>>.
- KALAIR, A.; ABAS, N.; KALAIR, A.; SALEEM, Z.; KHAN, N. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017. Elsevier Ltd, v. 78, n. April, p. 1152–1187, 2017. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306226>>.
- KEMPNER, T. **Análise da Robustez e da Sensibilidade de Sistemas de Distribuição para a Alocação Otimizada de Medidores frente às Variações de Tensão de Curta Duração**. 1–166 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

- KERSTING, W. Radial distribution test feeders. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1991. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 3, p. 975–985, 1991.
- _____. Radial distribution test feeders. In: **2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)**. IEEE, 2001. v. 2, n. C, p. 908–912. ISBN 0-7803-6672-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/916993/>>.
- _____. **Distribution System Modeling and Analysis**. [S.l.]: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0812-7.
- KETABI, A.; SHEIBANI, M. R.; NOSRATABADI, S. M. Power quality meters placement using seeker optimization algorithm for harmonic state estimation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 2012. v. 43, n. 1, p. 141–149, 2012. ISSN 01420615.
- KUMAR, A.; DAS, B.; SHARMA, J. Genetic algorithm-based meter placement for static estimation of harmonic sources. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005. v. 20, n. 2 I, p. 1088–1096, 2005. ISSN 08858977.
- _____. Simple technique for placement of meters for estimation of harmonics in electric power system. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, 2005. v. 152, n. 1, p. 67, 2005. ISSN 13502360. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd\20040098>
<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd\20>>.
- LEITE, J. C.; ABRIL, I. P.; TOSTES, M. E. de L.; OLIVEIRA, R. C. L. de. Frequency scan on a phase-coordinates frame for unbalanced systems. **Electric Power Systems Research**, 2012. Elsevier BV, v. 93, p. 113–119, dec 2012.
- Leuven EMTP Center. **Alternative Transients Program (ATP): Rule Book**. [S.l.]: EMTP, 1987.
- LI, Y.; SAHA, T. K.; KRAUSE, O.; CAO, Y.; LIU, F. Hybrid inductive and active filtering method for damping harmonic resonance in distribution network with non-linear loads. **IET Power Electronics**, 2015. Institution of Engineering and Technology (IET), v. 8, n. 9, p. 1616–1624, sep 2015.
- LI, Z.; HU, H.; ZHOU, Y.; HE, Z. A rapid modal analysis method for harmonic resonance using modified power iteration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 3, p. 1495–1497, jun 2018.
- LIAO, H. Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2007. v. 22, n. 1, p. 15–23, 2007. ISSN 08858950.
- MADTHARAD, C.; PREMRUDEEPREECHACHARN, S.; WATSON, N.; SAENGUDOM, R. An Optimal Measurement Placement Method for Power System Harmonic State Estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005. v. 20, n. 2, p. 1514–1521, apr 2005. ISSN 0885-8977. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1413421/>>.

- MARTINS, P. E. T.; ZVIETCOVICH, W. G.; SILVA, T. A. d. O.; JESUS, B. J. de. Allocation of power quality monitors by Clonal Algorithm. In: **2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. IEEE, 2016. p. 980–985. ISBN 978-1-5090-3792-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7783392/>>.
- MASOUM, M. A.; FUCHS, E. F. Optimal placement and sizing of shunt capacitor banks in the presence of harmonics. In: **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 887–959.
- MAZHARI, S. M.; SAHAMI, A.; KOUHSARI, S. M. A large-change sensitivity based approach for distributed harmonic resonance assessment in multi-area interconnected power systems. In: **2018 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)**. [S.l.]: IEEE, 2018.
- MELIOPOULAS, A.; FARDANESH, B.; ZELINGHER, S.; COKKINIDES, G. Harmonic measurement system via synchronized measurements. In: **2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)**. IEEE, 2000. v. 2, n. c, p. 1094–1100. ISBN 0-7803-6420-1. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/867531/>>.
- MELIOPOULOS, A.; COKKINIDES, G.; CHAKRAVARTHI, K. Effects of grounding on distribution system harmonic resonance conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1989. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 4, n. 1, p. 675–682, 1989.
- MELIOPOULOS, S.; ZHANG, F.; ZELINGHER, S. Power System Harmonic State Estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1994. v. 9, n. 3, p. 1701–1709, 1994. ISSN 19374208.
- MELO, I. D.; PEREIRA, J. L. R.; VARIZ, A. M.; GARCIA, P. A. N. Harmonic state estimation for distribution networks using phasor measurement units. **Electric Power Systems Research**, 2017. Elsevier B.V., v. 147, p. 133–144, 2017. ISSN 03787796. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.027>>.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes elétricas**. [S.l.: s.n.], 1983.
- MORAIS, T. **Um novo modelo de transformadores trifásicos para a análise harmônica trifásica em sistemas de distribuição**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2005.
- MUSCAS, C.; PILO, F.; PISANO, G.; SULIS, S. Optimal measurement devices allocation for harmonic state estimation considering parameters uncertainty in distribution networks. **2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU**, 2007. 2007.
- NASCIMENTO, C. F.; OLIVEIRA, A. A.; GOEDTEL, A.; DIETRICH, A. B. Harmonic distortion monitoring for nonlinear loads using neural-network-method. **Applied Soft Computing Journal**, 2013. Elsevier B.V., v. 13, n. 1, p. 475–482, 2013. ISSN 15684946. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2012.08.043>>.

- NIE, C.; LEI, W.; WANG, H.; ZHANG, K.; WANG, Y. Modeling and analysis of harmonic resonance in microgrid and research of active harmonic resistance method. In: **2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)**. [S.l.]: IEEE, 2015.
- OKUBO, S.; SUZUKI, H.; UEMURA, K. Modal analysis for power system dynamic stability. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1978. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-97, n. 4, p. 1313–1318, jul 1978.
- OLGUIN, G.; VUINOVICH, F.; BOLLEN, M. H. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2006. v. 21, n. 1, p. 378–384, 2006. ISSN 08858950.
- ONAKA, J. H. D.; LIMA, A. S. de; MANITO, A. R. A.; BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. L.; CARVALHO, C. C. M. d. M.; SOARES, T. M.; MENDES, D. C. Optimal capacitor banks placement in distribution grids using nsga ii and harmonic resonance chart. In: **2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 89–94.
- ORTEGA, J. M. M.; EXPOSITO, A. G.; GARCIA, A. L. T.; PAYAN, M. B. A state estimation approach to harmonic polluting load characterization in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2005. v. 20, n. 2, p. 765–772, May 2005. ISSN 0885-8950.
- PERES, P. L. D.; BONATTI, I. S. **Algebra Linear III**. fev. 2007. Disponível em: <<http://www.dt.fee.unicamp.br/~sala225/ia536/ia536.html>>.
- PEREZ-ARRIAGA, I. J.; VERGHESE, G. C.; SCHWEPPE, F. C. Selective modal analysis with applications to electric power systems, part i: Heuristic introduction. **IEEE Power Engineering Review**, 1982. PER-2, n. 9, p. 29–30, Sept 1982. ISSN 0272-1724.
- PHIPPS, J.; NELSON, J.; SEN, P. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1994. v. 30, n. 2, p. 476–484, 1994. ISSN 00939994. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=287506>>.
- PONGSRIWAT, C.; PREMRADEEPPREECHACHAM, S. Harmonic resonance assessment in low voltage distribution system. In: **2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004**. [S.l.]: IEEE, 2004.
- PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. **AtpDraw Version 3.5 For Windows 9x/Nt/2000/Xp - User Manual**. [S.l.]: Sinef Energy Research, 2002.
- RAD, M. S.; MOKHTARI, H.; KARIMI, H. An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation. **EPE 2012 - Proceedings of the 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering**, 2012. n. Epe, p. 271–275, 2012. ISSN 08858977.
- RAD, M. S.; MOKHTARI, H.; KARIMI, H. A new algorithm for optimal measurement placement, observability analysis and Harmonic State Estimation in power systems. **4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies**

Conference, 2013. p. 518–523, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6506762>>.

RAKPENTHAI, C.; PREMRUDEEPPREECHACHARN, S.; UATRONGJIT, S.; WATSON, N. R. An improved PMUs placement method for power system state estimation. **2005 International Power Engineering Conference**, 2005. v. 21, n. 3, p. 59, 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=1627>.

RAUMA, K.; HASAN, K. M.; GAVRILUTA, C.; CITRO, C. Resonance analysis of a wind power plant with modal approach. In: **2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. [S.l.]: IEEE, 2012.

SHARMA, V.; FLEMING, R. I.; NIEKAMP, L. An iterative approach for analysis of harmonic penetration in the power transmission networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1991. v. 6, n. 4, p. 1698–1706, Oct 1991. ISSN 0885-8977.

SIMPSON, R. Misapplication of power capacitors in distribution systems with nonlinear loads—three case histories. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 41, n. 1, p. 134–143, jan 2005.

SONG, W.; HEYDT, G. T.; GRADY, W. M. The integration of hvdc subsystems into the harmonic power flow algorithm. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1984. PAS-103, n. 8, p. 1953–1961, Aug 1984. ISSN 0018-9510.

WANG, Y.; CHEUNG, Y.; LIU, H. **Computational Intelligence and Security**. [S.l.]: Revised Selected Papers, 2006.

WATSON, N. R.; ARRILLAGA, J. Harmonics in large systems. **Electric Power Systems Research**, 2003. v. 66, n. 1, p. 15–29, 2003. ISSN 03787796.

WILLIAMS, S. M.; BROWNFIELD, G. T.; DUFFUS, J. W. Harmonic propagation on an electric distribution system: field measurements compared with computer simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1993. v. 8, n. 2, p. 547–552, Apr 1993. ISSN 0885-8977.

XU, W. Component modeling issues for power quality assessment. **IEEE Power Engineering Review**, 2001. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 11, p. 12–17, nov 2001.

XU, W.; AHMED, E. E.; ZHANG, X.; LIU, X. Measurement of network harmonic impedances: Practical implementation issues and their solutions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2002. v. 17, n. 1, p. 210–216, 2002. ISSN 08858977.

XU, W.; HUANG, Z.; CUI, Y.; WANG, H. Harmonic resonance mode analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005. v. 20, n. 2 I, p. 1182–1190, 2005. ISSN 08858977.

XU, W.; MARTI, J. R.; DOMMEL, H. W. A multiphase harmonic load flow solution technique. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1991. v. 6, n. 1, p. 174–182, Feb 1991. ISSN 0885-8950.

YANG, C.; LIU, K.; WANG, D. Harmonic resonance circuits modeling and simulation. In: **2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**. [S.l.]: IEEE, 2009.

YANG, C.; LIU, K.; ZHANG, Q. An improved modal analysis method for harmonic resonance analysis. In: **2008 IEEE International Conference on Industrial Technology**. [S.l.]: IEEE, 2008.

Apêndices

Sistema de 13 Barras Concentrado

Os FPs apresentados nesta seção não estão normalizados.

A.1 Frequência de 180 Hz

A.1.1 FP

Tabela 45 – FPs para a frequência de 180 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 180 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,0010
2 (632)	0,0590
3 (633)	0,0440
4 (671)	0,2740
5 (675)	0,2960
6 (680)	0,3260

A.1.2 MDHT

Tabela 46 – A MDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	5,534992756	5,647537513	5,643711114	5,843992251	5,89341683	5,843999461
2 (632)	5,797063891	10,26292856	10,25598444	10,61994919	10,70974141	10,61996139
3 (633)	5,796997524	10,26281904	11,65556811	10,619825	10,70961588	10,61983137
4 (671)	6,148444292	10,88499792	10,87761675	15,63838868	15,77062157	15,63839764
5 (675)	6,215696661	11,00408086	10,99661848	15,80947438	16,7832552	15,8094862
6 (680)	6,148447747	10,88500394	10,87761965	15,63839851	15,77063128	17,72898879

A.1.3 MCDHT

Tabela 47 – A distorção harmônica total da tensão e os novos limiares obtidos para a frequência de 180 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{m\acute{a}x}$	17,73 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,94
$DHT_{10\%}$	15,96 %	$\sigma_{10\%}$	0,85
$DHT_{20\%}$	14,18 %	$\sigma_{20\%}$	0,75
$DHT_{30\%}$	12,41 %	$\sigma_{30\%}$	0,66
$DHT_{40\%}$	10,64 %	$\sigma_{40\%}$	0,57
$DHT_{50\%}$	8,86 %	$\sigma_{50\%}$	0,47

Tabela 48 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,85, 0,75 e 0,66.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 49 – A MCDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiares de 0,57 e 0,47.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.2 Frequência de 300 Hz

A.2.1 FP

Tabela 50 – FPs na frequência de 300 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 300 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 5
2 (632)	0,054 9
3 (633)	0,040 2
4 (671)	0,277 2
5 (675)	0,309 2
6 (680)	0,318 1

A.2.2 MDHT

Tabela 51 – MDHT para a fonte harmônica (1) na frequência de 300 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	9,066778754	10,18169442	10,17454528	12,00201203	12,37418755	12,00203582
2 (632)	10,45125726	18,53293203	18,5199487	21,84631414	22,5237764	21,84634922
3 (633)	10,45089112	18,53226538	20,38723574	21,84553928	22,52296634	21,84559346
4 (671)	12,62725553	22,39153728	22,37584414	32,1904499	33,1886746	32,19052079
5 (675)	13,05090372	23,14278036	23,1265603	33,27044724	35,27901331	33,270516
6 (680)	12,62728122	22,39156652	22,37588032	32,19051853	33,18873912	34,46266688

A.2.3 MCDHT

Tabela 52 – A distorção harmônica total da tensão e os novos limiares obtidos para a frequência de 300 Hz sobre o sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{máx}$	35,28 %	$\sigma_{máx}$	0,96
$DHT_{10\%}$	31,75 %	$\sigma_{10\%}$	0,87
$DHT_{20\%}$	28,22 %	$\sigma_{20\%}$	0,77
$DHT_{30\%}$	21,69 %	$\sigma_{30\%}$	0,67
$DHT_{40\%}$	21,17 %	$\sigma_{40\%}$	0,58
$DHT_{50\%}$	17,64 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 53 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 54 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,87, 0,77 e 0,67.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 55 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,58.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 56 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,48.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.3 Frequência de 420 Hz

A.3.1 FP

Tabela 57 – FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 420 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 3
2 (632)	0,050 5
3 (633)	0,035 8
4 (671)	0,281 3
5 (675)	0,328 9
6 (680)	0,303 1

A.3.2 MDHT

Tabela 58 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	8,060295145	9,185610977	9,178854175	13,63343736	14,54411734	13,63349554
2 (632)	9,428815636	16,727465	16,71514792	24,82716738	26,48556326	24,82726175
3 (633)	9,428156053	16,72627655	17,59918139	24,82541666	26,48369761	24,8255133
4 (671)	14,34366235	25,44678098	25,42805229	36,59192076	39,03618863	36,59207376
5 (675)	15,33948484	27,21346316	27,19342843	39,13237896	41,48720811	39,132521
6 (680)	14,34370771	25,44687305	25,4281611	36,59207003	39,03633337	35,54233105

A.3.3 MCDHT

Tabela 59 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 420 Hz do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{m\acute{a}x}$	41,49 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,98
$DHT_{10\%}$	37,34 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	33,19 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	29,04 %	$\sigma_{30\%}$	0,69
$DHT_{40\%}$	24,89 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	20,74 %	$\sigma_{50\%}$	0,49

Tabela 60 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 61 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,89.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	0	1	0

Tabela 62 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,79 e 0,69.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 63 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,59 e 0,49.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.4 Frequência de 524 Hz

A.4.1 FP

Tabela 64 – FP da frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 524 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 3
2 (632)	0,046 0
3 (633)	0,031 4
4 (671)	0,285 3
5 (675)	0,351 9
6 (680)	0,285 1

A.4.2 MDHT

Tabela 65 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	6,321179444	4,994951064	4,991076104	9,93340165	11,03201021	9,933460631
2 (632)	6,630529077	9,097571273	9,090515281	18,09223501	20,09318726	18,09234313
3 (633)	6,630401221	9,096566146	10,12972777	18,09023415	20,0909693	18,09034369
4 (671)	7,389618052	18,5437679	18,529377	26,66986178	29,6194813	26,67002326
5 (675)	7,556423809	20,64540478	20,62938174	29,69245559	31,48113627	29,69263731
6 (680)	7,389626869	18,54387867	18,52948703	26,67002043	29,61965114	22,72999484

A.4.3 MCDHT

Tabela 66 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 524 Hz do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{máx}$	31,48 %	$\sigma_{máx}$	0,99
$DHT_{10\%}$	28,33 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	25,18 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	22,04 %	$\sigma_{30\%}$	0,69
$DHT_{40\%}$	18,89 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	15,74 %	$\sigma_{50\%}$	0,49

Tabela 67 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 68 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,89.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	0	1	0

Tabela 69 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,79.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 70 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,69 e 0,59.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 71 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 524 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,49.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.5 Frequência de 540 Hz

A.5.1 FP

Tabela 72 – FP da frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 540 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 2
2 (632)	0,045 3
3 (633)	0,030 7
4 (671)	0,285 9
5 (675)	0,355 9
6 (680)	0,282 0

A.5.2 MDHT

Tabela 73 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	7,739939759	4,52709763	4,523555881	9,419344521	10,53610611	9,419401314
2 (632)	4,64695507	8,2455771	8,239118238	17,15624522	19,19029814	17,15636763
3 (633)	4,646414017	8,244612574	9,552936209	17,15423358	19,18805074	17,15434966
4 (671)	9,910027939	17,58442603	17,57066342	25,29073027	28,28918988	25,290904
5 (675)	11,11228338	19,71771362	19,70226309	28,35891561	30,06784061	28,35908876
6 (680)	9,910106811	17,58453615	17,57076902	25,29090284	28,28939314	21,01694562

A.5.3 MCDHT

Tabela 74 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 540 Hz do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{m\acute{a}x}$	30,07 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,98
$DHT_{10\%}$	27,06 %	$\sigma_{10\%}$	0,88
$DHT_{20\%}$	24,05 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	21,05 %	$\sigma_{30\%}$	0,69
$DHT_{40\%}$	18,04 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	15,03 %	$\sigma_{50\%}$	0,49

Tabela 75 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 76 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,88.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	0	1	0

Tabela 77 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,79.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 78 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,69.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 79 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,59.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 80 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,49.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.6 Frequência de 660 Hz

A.6.1 FP

Tabela 81 – FP da frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 660 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 2
2 (632)	0,039 4
3 (633)	0,025 2
4 (671)	0,290 0
5 (675)	0,390 2
6 (680)	0,255 0

A.6.2 MDHT

Tabela 82 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	10,1140757	3,190280213	3,187594666	6,516712645	7,759852088	6,51676864
2 (632)	3,274735577	5,811239471	5,806354128	11,87049474	14,13494837	11,87061275
3 (633)	3,274173767	5,810229941	10,02920314	11,86840719	14,13245416	11,86851759
4 (671)	6,856191476	12,16675801	12,1565111	17,50197862	20,84069586	17,50214865
5 (675)	8,184219262	14,52341915	14,51118974	20,8920576	22,15564841	20,89224503
6 (680)	6,856260498	12,16686995	12,15662594	17,50215012	20,8409053	11,31520096

A.6.3 MCDHT

Tabela 83 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 660 Hz do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{máx}$	22,16 %	$\sigma_{máx}$	0,87
$DHT_{10\%}$	19,94 %	$\sigma_{10\%}$	0,78
$DHT_{20\%}$	17,72 %	$\sigma_{20\%}$	0,70
$DHT_{30\%}$	15,51 %	$\sigma_{30\%}$	0,61
$DHT_{40\%}$	13,29 %	$\sigma_{40\%}$	0,52
$DHT_{50\%}$	11,08 %	$\sigma_{50\%}$	0,44

Tabela 84 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{máx}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	0	1	0

Tabela 85 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,78 e 0,70.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 86 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,61.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 87 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,52 e 0,44.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	0

A.7 Frequência de 780 Hz

A.7.1 FP

Tabela 88 – FP da frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 780 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 1
2 (632)	0,033 2
3 (633)	0,019 6
4 (671)	0,292 6
5 (675)	0,431 3
6 (680)	0,223 1

A.7.2 MDHT

Tabela 89 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	12,79004886	4,418132194	4,414112132	4,74130181	6,119539059	4,741359982
2 (632)	4,535126294	8,048235513	8,040899469	8,636908005	11,14755757	8,637026313
3 (633)	4,53400119	8,046246739	13,84135579	8,634774346	11,14481053	8,634893312
4 (671)	4,988304132	8,852466541	8,844388618	12,73686523	16,43930467	12,73702781
5 (675)	6,454186692	11,45392058	11,4434721	16,47982265	17,48171988	16,48003565
6 (680)	4,988367156	8,852577776	8,844503349	12,73702443	16,43952864	5,630621728

A.7.3 MCDHT

Tabela 90 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 780 Hz do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{máx}$	17,48 %	$\sigma_{máx}$	0,35
$DHT_{10\%}$	15,73 %	$\sigma_{10\%}$	0,31
$DHT_{20\%}$	13,99 %	$\sigma_{20\%}$	0,28
$DHT_{30\%}$	12,24 %	$\sigma_{30\%}$	0,24
$DHT_{40\%}$	10,49 %	$\sigma_{40\%}$	0,21
$DHT_{50\%}$	8,74 %	$\sigma_{50\%}$	0,17

Tabela 91 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,31.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	1	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	0

Tabela 92 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,28.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	1	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

Tabela 93 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,24, 0,21, 0,17.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

A.8 Frequência de 900 Hz

A.8.1 FP

Tabela 94 – FP da frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Frequência de 900 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 1
2 (632)	0,027 1
3 (633)	0,014 5
4 (671)	0,292 3
5 (675)	0,477 9
6 (680)	0,188 1

A.8.2 MDHT

Tabela 95 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	15,40476427	6,08820453	6,082156873	3,539905867	5,06424203	3,539966922
2 (632)	6,24940258	11,09076105	11,07973848	6,448566959	9,22542927	6,448685982
3 (633)	6,247353269	11,08710918	17,89911273	6,446434067	9,222393705	6,446560349
4 (671)	3,724310312	6,609514727	6,602935641	9,511790481	13,60774301	9,511958523
5 (675)	5,341194103	9,478973149	9,469548215	13,6412678	14,47592978	13,64150994
6 (680)	3,724376214	6,609613147	6,603037259	9,511957209	13,60797559	4,119197981

A.8.3 MCDHT

Tabela 96 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{m\acute{a}x}$	17,90 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,22
$DHT_{10\%}$	16,11 %	$\sigma_{10\%}$	0,20
$DHT_{20\%}$	14,32 %	$\sigma_{20\%}$	0,18
$DHT_{30\%}$	12,53 %	$\sigma_{30\%}$	0,16
$DHT_{40\%}$	10,74 %	$\sigma_{40\%}$	0,13
$DHT_{50\%}$	8,95 %	$\sigma_{50\%}$	0,11

Tabela 97 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	1	1	0	1	0
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 98 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,20.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	1	1	0	1	0
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

Tabela 99 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,18, 0,16, 0,13 e 0,11.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

A.9 ASD

A.9.1 FP

Tabela 100 – Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras concentrado.

Média dos FPs (ASD)	
Barra	FP
1 (650)	0,000 4
2 (632)	0,044 2
3 (633)	0,030 0
4 (671)	0,284 7
5 (675)	0,369 9
6 (680)	0,270 8

A.9.2 MDHT

Tabela 101 – MDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	6,321179444	6,45951321	6,455084222	7,023723097	7,16462379	7,02373375
2 (632)	6,630529077	11,74326142	11,73521202	12,77075656	13,02733396	12,77077472
3 (633)	6,630401221	11,74302422	13,25951736	12,77045521	13,02700737	12,77047421
4 (671)	7,389618052	13,08946854	13,08045923	18,80973934	19,18793779	18,80976939
5 (675)	7,556423809	13,38535501	13,3761187	19,2352169	20,41213255	19,23524429
6 (680)	7,389626869	13,08948794	13,08047298	18,80977374	19,18795344	20,77707079

A.9.3 MCDHT

Tabela 102 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica ASD do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{m\acute{a}x}$	20,78 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,93
$DHT_{10\%}$	18,70 %	$\sigma_{10\%}$	0,83
$DHT_{20\%}$	16,62 %	$\sigma_{20\%}$	0,74
$DHT_{30\%}$	14,54 %	$\sigma_{30\%}$	0,65
$DHT_{40\%}$	12,47 %	$\sigma_{40\%}$	0,56
$DHT_{50\%}$	10,39 %	$\sigma_{50\%}$	0,46

Tabela 103 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 104 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,83, 0,74 e 0,65.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 105 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,56 e 0,46.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.10 Outros

A.10.1 FP

Tabela 106 – Média dos FPs da fonte outros para o sistema de 13 barras concentrado.

Média dos FPs (Outros)	
Barra	FP
1 (650)	0,000 6
2 (632)	0,054 3
3 (633)	0,039 5
4 (671)	0,277 8
5 (675)	0,313 4
6 (680)	0,314 4

A.10.2 MDHT

Tabela 107 – MDHT da fonte outros para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Barra	Carga_650	Carga_632	Carga_633	Carga_671	Carga_675	Carga_680
1 (650)	1,935862261	2,179081527	2,177543704	2,662047513	2,762570911	2,662055852
2 (632)	2,236774607	3,966209264	3,963421883	4,845621105	5,028631286	4,845629464
3 (633)	2,236681054	3,966055528	4,339463198	4,845417442	5,028419889	4,845425415
4 (671)	2,800739099	4,966558627	4,963034195	7,140160661	7,409874778	7,140179428
5 (675)	2,913645221	5,166831104	5,163179113	7,42813936	7,876668023	7,428153167
6 (680)	2,80074247	4,966565596	4,963049586	7,140178523	7,409895596	7,516843951

A.10.3 MCDHT

Tabela 108 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica outros do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{máx}$	7,88 %	$\sigma_{máx}$	0,97
$DHT_{10\%}$	7,09 %	$\sigma_{10\%}$	0,87
$DHT_{20\%}$	6,30 %	$\sigma_{20\%}$	0,78
$DHT_{30\%}$	5,51 %	$\sigma_{30\%}$	0,68
$DHT_{40\%}$	4,73 %	$\sigma_{40\%}$	0,58
$DHT_{50\%}$	3,94 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 109 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 110 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,87, 0,78 e 0,68.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 111 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,58.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 112 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,48.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

A.11 Fluorescente

A.11.1 FP

Tabela 113 – Média dos FPs da fonte fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado.

Média dos FP (Flu.)	
Barra	FP
1 (650)	0,000 4
2 (632)	0,044 2
3 (633)	0,030 0
4 (671)	0,284 7
5 (675)	0,369 9
6 (680)	0,270 8

A.11.2 MDHT

Tabela 114 – MDHT da fonte florescente para o sistema de 13 barras concentrado.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	2,752939124	2,920447728	2,918440475	3,258125148	3,333045547	3,258128912
2 (632)	2,997763362	5,311475747	5,307817096	5,926334132	6,062755203	5,92634258
3 (633)	2,997690492	5,311346986	5,940477778	5,926193317	6,062590479	5,926206246
4 (671)	3,427848119	6,074255578	6,070060329	8,730080367	8,931112167	8,730089035
5 (675)	3,515316555	6,229372146	6,225056973	8,953114878	9,498228189	8,953131729
6 (680)	3,427854742	6,074266537	6,07006791	8,730090645	8,931126475	9,554658985

A.11.3 MCDHT

Tabela 115 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica fluorescente do sistema de 13 barras concentrado.

$DHT_{máx}$	9,55 %	$\sigma_{máx}$	0,93
$DHT_{10\%}$	8,60 %	$\sigma_{10\%}$	0,84
$DHT_{20\%}$	7,64 %	$\sigma_{20\%}$	0,75
$DHT_{30\%}$	6,69 %	$\sigma_{30\%}$	0,65
$DHT_{40\%}$	5,73 %	$\sigma_{40\%}$	0,56
$DHT_{50\%}$	4,78 %	$\sigma_{50\%}$	0,47

Tabela 116 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	0	1	1

Tabela 117 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para os limiares de 0,84, 0,75 e 0,65.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 118 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,56.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 119 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras concentrado para o limiar de 0,46.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Sistema de 13 Barras Individual

Os FPs apresentados nesta seção não estão normalizados.

B.1 Frequência de 180 Hz

B.1.1 FP

Tabela 120 – FP da frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 180 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,001 2
2 (632)	0,059 5
3 (633)	0,044 5
4 (671)	0,274 7
5 (675)	0,291 5
6 (680)	0,328 7

B.1.2 MDHT

Tabela 121 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	5,430056011	5,424549586	5,422092533	5,485000196	5,465178026	5,485003225
2 (632)	5,580171034	9,878816255	9,8743549	9,989043167	9,952946353	9,989050394
3 (633)	5,581219665	9,880684902	11,2885603	9,990924335	9,954822567	9,990935715
4 (671)	5,797079562	10,26295776	10,25831965	14,73734423	14,68407446	14,73734596
5 (675)	5,798081582	10,26474841	10,26009591	14,73989855	15,52656037	14,7399068
6 (680)	5,797082833	10,26296859	10,25833064	14,73734499	14,68408298	16,87354333

B.1.3 MCDHT

Tabela 122 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	16,87 %	$\sigma_{máx}$	0,93
$DHT_{10\%}$	15,19 %	$\sigma_{10\%}$	0,84
$DHT_{20\%}$	13,50 %	$\sigma_{20\%}$	0,75
$DHT_{30\%}$	11,81 %	$\sigma_{30\%}$	0,65
$DHT_{40\%}$	10,12 %	$\sigma_{40\%}$	0,56
$DHT_{50\%}$	8,44 %	$\sigma_{50\%}$	0,47

Tabela 123 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{máx}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 124 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,84 e 0,75.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 125 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,65.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 126 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,56 e 0,47.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.2 Frequência de 300 Hz

B.2.1 FP

Tabela 127 – FP da frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 300 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 6
2 (632)	0,056 6
3 (633)	0,041 8
4 (671)	0,279 8
5 (675)	0,295 6
6 (680)	0,325 6

B.2.2 MDHT

Tabela 128 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	8,999644602	9,475545295	9,474849086	10,37354956	10,33962381	10,37357178
2 (632)	9,747385079	17,28490633	17,28362305	18,92284662	18,86096604	18,9228897
3 (633)	9,75291525	17,29470267	19,39845033	18,9335877	18,8716542	18,93362457
4 (671)	10,96377373	19,4417526	19,44032422	27,91082207	27,81953806	27,91088328
5 (675)	10,96946711	19,45182664	19,45040221	27,92528661	28,97615753	27,92534356
6 (680)	10,96379526	19,44179007	19,44035786	27,91088092	27,81959625	30,80910873

B.2.3 MCDHT

Tabela 129 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 300 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	30,81 %	$\sigma_{máx}$	0,95
$DHT_{10\%}$	27,73 %	$\sigma_{10\%}$	0,86
$DHT_{20\%}$	24,65 %	$\sigma_{20\%}$	0,76
$DHT_{30\%}$	21,57 %	$\sigma_{30\%}$	0,67
$DHT_{40\%}$	18,49 %	$\sigma_{40\%}$	0,57
$DHT_{50\%}$	15,40 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 130 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{máx}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 131 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,86, 0,76 e 0,67.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 132 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,57.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 133 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.3 Frequência de 420 Hz

B.3.1 FP

Tabela 134 – FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 420 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 4
2 (632)	0,053 8
3 (633)	0,038 8
4 (671)	0,287 0
5 (675)	0,301 7
6 (680)	0,318 4

B.3.2 MDHT

Tabela 135 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	10,86350221	12,04729415	12,05328318	14,97619761	14,93493976	14,97625591
2 (632)	12,39291211	21,98626602	21,99717388	27,33117248	27,25587356	27,33128039
3 (633)	12,40701973	22,01127492	24,06389915	27,36228057	27,2868926	27,36238636
4 (671)	15,82829599	28,08065029	28,09459606	40,26876003	40,15783359	40,26891821
5 (675)	15,8446855	28,10973488	28,12370229	40,31046178	40,94205774	40,31062502
6 (680)	15,8283568	28,08075442	28,09470347	40,26891466	40,1579611	41,97072057

B.3.3 MCDHT

Tabela 136 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 420 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	41,97 %	$\sigma_{máx}$	0,97
$DHT_{10\%}$	37,77 %	$\sigma_{10\%}$	0,87
$DHT_{20\%}$	33,58 %	$\sigma_{20\%}$	0,77
$DHT_{30\%}$	29,38 %	$\sigma_{30\%}$	0,68
$DHT_{40\%}$	25,18 %	$\sigma_{40\%}$	0,58
$DHT_{50\%}$	20,99 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 137 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{máx}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 138 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,87, 0,77 e 0,68.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 139 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,58.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 140 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.4 Frequência de 540 Hz

B.4.1 FP

Tabela 141 – FP da frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 540 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 3
2 (632)	0,050 6
3 (633)	0,035 4
4 (671)	0,296 3
5 (675)	0,309 3
6 (680)	0,308 1

B.4.2 MDHT

Tabela 142 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	9,788331582	9,928908013	9,941454894	14,79680388	14,76622311	14,79689768
2 (632)	10,21375211	18,12365102	18,14652609	27,00876277	26,95293605	27,00893375
3 (633)	10,23321352	18,15815755	19,46126725	27,06020849	27,00428654	27,06038246
4 (671)	15,63869588	27,74939411	27,78444166	39,72908674	39,64697863	39,72934311
5 (675)	15,6656984	27,79729773	27,83241128	39,79767684	39,26992951	39,79793827
6 (680)	15,63879497	27,74956773	27,78461704	39,72934017	39,64722175	38,17597406

B.4.3 MCDHT

Tabela 143 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 540 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	39,80 %	$\sigma_{máx}$	0,98
$DHT_{10\%}$	35,82 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	31,84 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	27,86 %	$\sigma_{30\%}$	0,69
$DHT_{40\%}$	23,88 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	19,90 %	$\sigma_{50\%}$	0,49

Tabela 144 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{máx}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 145 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,89 e 0,79.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 146 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,69.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 147 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 540 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,59 e 0,49.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.5 Frequência de 601 Hz

B.5.1 FP

Tabela 148 – FP da frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 601 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 2
2 (632)	0,048 9
3 (633)	0,033 5
4 (671)	0,301 8
5 (675)	0,313 7
6 (680)	0,301 8

B.5.2 MDHT

Tabela 149 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	9,519867054	8,071425086	8,085372857	13,44030576	13,41812337	13,44041159
2 (632)	8,302981147	14,73331297	14,7588003	24,53402272	24,49353047	24,53421736
3 (633)	8,322659743	14,76826173	16,01651339	24,59220258	24,55161534	24,59239655
4 (671)	14,20501834	25,2067913	25,25038191	36,05235896	35,99285619	36,05264298
5 (675)	14,23548022	25,2608488	25,30453082	36,12967279	35,02104755	36,1299594
6 (680)	14,20512925	25,2069896	25,25057925	36,05263989	35,99313809	32,88920433

B.5.3 MCDHT

Tabela 150 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 601 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	36,13 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,99
$DHT_{10\%}$	32,52 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	28,90 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	25,29 %	$\sigma_{30\%}$	0,69
$DHT_{40\%}$	21,68 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	18,06 %	$\sigma_{50\%}$	0,50

Tabela 151 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 152 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,89 e 0,79.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 153 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,69.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 154 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 601 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,59 e 0,50.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.6 Frequência de 660 Hz

B.6.1 FP

Tabela 155 – FP da frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 660 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 2
2 (632)	0,047 1
3 (633)	0,031 6
4 (671)	0,307 7
5 (675)	0,318 2
6 (680)	0,295 1

B.6.2 MDHT

Tabela 156 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	9,857670509	6,487563393	6,502036064	12,06340583	12,04887305	12,06351961
2 (632)	6,673681708	11,84317231	11,86956731	22,02142752	21,99488527	22,02163308
3 (633)	6,692855974	11,87717606	13,54475009	22,08468131	22,05807545	22,08489502
4 (634)	12,74977587	22,62529226	22,67575377	32,32474362	32,28580065	32,32504973
5 (671)	12,78282291	22,68393248	22,7345286	32,40851942	30,81118973	32,40882701
6 (675)	12,74989593	22,62550663	22,67596823	32,32504709	32,28609572	27,8266708

B.6.3 MCDHT

Tabela 157 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 660 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	32,41 %	$\sigma_{máx}$	0,99
$DHT_{10\%}$	29,17 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	25,93 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	22,69 %	$\sigma_{30\%}$	0,69
$DHT_{40\%}$	19,45 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	16,20 %	$\sigma_{50\%}$	0,50

Tabela 158 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{máx}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 159 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,89.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 160 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,79.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 161 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,69.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 162 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,59 e 0,50.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.7 Frequência de 780 Hz

B.7.1 FP

Tabela 163 – FP da frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 780 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 2
2 (632)	0,043 3
3 (633)	0,027 7
4 (671)	0,321 2
5 (675)	0,328 0
6 (680)	0,279 5

B.7.2 MDHT

Tabela 164 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	11,69256906	4,578842994	4,594435802	9,742056472	9,743820979	12,06351961
2 (632)	4,710203082	8,359194108	8,387638117	17,78469386	17,78792022	22,02163308
3 (633)	4,729271775	8,393014296	12,24057926	17,85669462	17,85992915	22,08489502
4 (634)	10,29807773	18,27545522	18,33768073	26,03843449	26,04315544	32,32504973
5 (671)	10,33547983	18,34183076	18,4042913	23,72140951	26,1377547	32,40882701
6 (675)	10,29821474	18,27569761	18,33792528	26,03878353	19,38134004	27,8266708

B.7.3 MCDHT

Tabela 165 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 780 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	32,41 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,96
$DHT_{10\%}$	29,17 %	$\sigma_{10\%}$	0,86
$DHT_{20\%}$	25,93 %	$\sigma_{20\%}$	0,77
$DHT_{30\%}$	22,69 %	$\sigma_{30\%}$	0,67
$DHT_{40\%}$	19,45 %	$\sigma_{40\%}$	0,58
$DHT_{50\%}$	16,20 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 166 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,89.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 167 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,77.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	0	1	1
6	0	0	0	1	0	1

Tabela 168 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 660 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,67.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	0	1

Tabela 169 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,58.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 170 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 780 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.8 Frequência de 900 Hz

B.8.1 FP

Tabela 171 – FP da frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 900 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 2
2 (632)	0,039 5
3 (633)	0,023 8
4 (671)	0,336 5
5 (675)	0,338 2
6 (680)	0,261 9

B.8.2 MDHT

Tabela 172 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	14,08584801	4,539754252	4,561519069	8,107293208	8,115753754	8,107435692
2 (632)	4,66999242	8,287934822	8,327661957	14,80070849	14,81617134	14,80096906
3 (633)	4,695390182	8,333000295	14,44271188	14,8812107	14,89676055	14,88147408
4 (634)	8,568571563	15,20657336	15,2794859	21,60314749	21,62572175	21,60353995
5 (671)	8,610133196	15,28031824	15,35359366	21,70791975	18,61048394	21,70830672
6 (675)	8,568723656	15,20683852	15,27975572	21,60353841	21,62611046	13,30008549

B.8.3 MCDHT

Tabela 173 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 900 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	21,71 %	$\sigma_{máx}$	0,71
$DHT_{10\%}$	19,54 %	$\sigma_{10\%}$	0,64
$DHT_{20\%}$	17,37 %	$\sigma_{20\%}$	0,57
$DHT_{30\%}$	15,20 %	$\sigma_{30\%}$	0,50
$DHT_{40\%}$	13,02 %	$\sigma_{40\%}$	0,43
$DHT_{50\%}$	10,85 %	$\sigma_{50\%}$	0,36

Tabela 174 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	0

Tabela 175 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,64

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	0

Tabela 176 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,57, 0,50 e 0,43.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 177 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 900 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,36

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	1	1	1
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

B.9 Frequência de 1000 Hz

B.9.1 FP

Tabela 178 – FP da frequência de 1000 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 1000 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 1
2 (632)	0,036 2
3 (633)	0,020 6
4 (671)	0,350 6
5 (675)	0,346 5
6 (680)	0,245 9

B.9.2 MDHT

Tabela 179 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1000 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	16,16732419	5,375799714	5,40872523	7,112078747	7,127660466	7,112235632
2 (632)	5,530023108	9,814268702	9,874367842	12,98398004	13,01242792	12,98426441
3 (633)	5,567459096	9,880697196	17,27021572	13,07187467	13,10051406	13,0721635
4 (634)	7,516735155	13,34002589	13,42172927	18,89568083	18,93708082	18,89609637
5 (671)	7,561833668	13,42007175	13,5022621	19,00906474	15,39812442	19,00947897
6 (675)	7,516898726	13,34031594	13,42202237	18,89609501	18,9374938	9,585037198

B.9.3 MCDHT

Tabela 180 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 1000 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	19,01 %	$\sigma_{máx}$	0,16
$DHT_{10\%}$	17,11 %	$\sigma_{10\%}$	0,14
$DHT_{20\%}$	15,21 %	$\sigma_{20\%}$	0,13
$DHT_{30\%}$	13,31 %	$\sigma_{30\%}$	0,11
$DHT_{40\%}$	11,41 %	$\sigma_{40\%}$	0,09
$DHT_{50\%}$	9,50 %	$\sigma_{50\%}$	0,08

Tabela 181 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,14, 0,13, 0,11, 0,09 e 0,08.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1

B.10 Frequência de 2000 Hz

B.10.1 FP

Tabela 182 – FP da frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 2000 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,001 6
2 (632)	0,382 2
3 (633)	0,595 5
4 (671)	0,001 9
5 (675)	0,006 6
6 (680)	0,012 3

B.10.2 MDHT

Tabela 183 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	36,65858882	17,49810409	18,02277257	3,377839988	3,447810539	3,378138401
2 (632)	18,00009667	31,94169936	32,89950711	6,166139002	6,293860757	6,166682136
3 (633)	18,55170117	32,92059631	49,67898889	6,355103511	6,48673931	6,3556632
4 (634)	3,570029055	6,335226826	6,52519136	8,50448834	8,680649598	8,505240411
5 (671)	3,657830503	6,49103491	6,685670369	8,713649658	1,541820943	8,714418063
6 (675)	3,570343655	6,335784272	6,525765267	8,505239339	8,681415173	16,93142077

B.10.3 MCDHT

Tabela 184 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 2000 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	49,68 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,76
$DHT_{10\%}$	44,71 %	$\sigma_{10\%}$	0,68
$DHT_{20\%}$	39,74 %	$\sigma_{20\%}$	0,60
$DHT_{30\%}$	34,78 %	$\sigma_{30\%}$	0,53
$DHT_{40\%}$	29,81 %	$\sigma_{40\%}$	0,45
$DHT_{50\%}$	24,84 %	$\sigma_{50\%}$	0,38

Tabela 185 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,68.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 186 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 2000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,60, 0,53, 0,45 e 0,38.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

B.11 Frequência de 3000 Hz

B.11.1 FP

Tabela 187 – FP da frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 3000 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,001 5
2 (632)	0,382 4
3 (633)	0,608 5
4 (671)	0,000 3
5 (675)	0,005 7
6 (680)	0,001 6

B.11.2 MDHT

Tabela 188 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	58,31268821	32,07952488	34,84077269	2,488258169	2,488755261	3,378138401
2 (632)	32,99983442	58,54599578	63,58536918	4,54113872	4,542049655	6,166682136
3 (633)	35,86327198	63,62612793	93,76364876	4,935182596	4,936170651	6,3556632
4 (634)	2,629831162	4,665667262	5,067266075	5,517352524	5,518457598	8,505240411
5 (671)	2,780967151	4,933790047	5,358468024	5,834421835	5,835588454	8,714418063
6 (675)	2,63035886	4,6666014	5,0682802	5,518456975	32,45277553	16,93142077

B.11.3 MCDHT

Tabela 189 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 3000 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{máx}$	93,76 %	$\sigma_{máx}$	0,84
$DHT_{10\%}$	84,39 %	$\sigma_{10\%}$	0,75
$DHT_{20\%}$	75,01 %	$\sigma_{20\%}$	0,67
$DHT_{30\%}$	63,63 %	$\sigma_{30\%}$	0,59
$DHT_{40\%}$	56,26 %	$\sigma_{40\%}$	0,50
$DHT_{50\%}$	46,88 %	$\sigma_{50\%}$	0,42

Tabela 190 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$ e 0,75.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 191 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 3000 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,67, 0,59, 0,50 e 0,42.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

B.12 Frequência de 4421 Hz

B.12.1 FP

Tabela 192 – FP da frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Frequência de 4421 Hz	
Barra	FP
1 (650)	0,000 0
2 (632)	0,012 4
3 (633)	0,010 8
4 (671)	0,059 0
5 (675)	0,859 1
6 (680)	0,058 7

B.12.2 MDHT

Tabela 193 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	72,36711989	34,88474892	44,03829367	1,176131679	1,330534384	1,176653041
2 (632)	35,88553761	63,63060736	80,32714993	2,145310573	2,426945927	2,146260829
3 (633)	45,33072021	80,37864009	117,2970051	2,709969975	3,065731622	2,711170178
4 (671)	1,243050398	2,204139096	2,782499961	3,757023631	4,250243223	3,758689395
5 (675)	1,411582685	2,502975343	3,159747773	4,266397811	17,02019555	4,268289409
6 (680)	1,243601929	2,205115319	2,783731217	3,758689015	4,252125779	52,66202633

B.12.3 MCDHT

Tabela 194 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 4421 Hz do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	117,30 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,50
$DHT_{10\%}$	105,57 %	$\sigma_{10\%}$	0,45
$DHT_{20\%}$	93,84 %	$\sigma_{20\%}$	0,40
$DHT_{30\%}$	82,11 %	$\sigma_{30\%}$	0,35
$DHT_{40\%}$	70,38 %	$\sigma_{40\%}$	0,30
$DHT_{50\%}$	58,65 %	$\sigma_{50\%}$	0,25

Tabela 195 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,45, 0,40 e 0,35 .

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0

Tabela 196 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,30.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	0	1	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 197 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4421 Hz para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,25.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	1	1	1	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1

B.13 ASD

B.13.1 FP

Tabela 198 – Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual.

Média dos FP (ASD)	
Barra	FP
1 (650)	0,000 4
2 (632)	0,050 1
3 (633)	0,034 8
4 (671)	0,300 5
5 (675)	0,311 8
6 (680)	0,302 5

B.13.2 MDHT

Tabela 199 – MDHT da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	6,295598188	6,304589181	6,302838985	6,679602386	6,657154544	6,679612395
2 (632)	6,485458674	11,48745514	11,48423975	12,17201483	12,13112133	12,17203551
3 (633)	6,487814394	11,4916016	13,05723299	12,17774268	12,13682509	12,17776237
4 (671)	7,059651053	12,50579427	12,50366502	17,95075284	17,89042999	17,95078511
5 (675)	7,062669298	12,51114946	12,50903086	17,95842401	18,72245923	17,95845003
6 (680)	7,059662161	12,50581354	12,50368302	17,95078415	17,89045276	20,05017653

B.13.3 MCDHT

Tabela 200 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte ASD do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	20,05 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,93
$DHT_{10\%}$	18,05 %	$\sigma_{10\%}$	0,84
$DHT_{20\%}$	16,04 %	$\sigma_{20\%}$	0,74
$DHT_{30\%}$	14,03 %	$\sigma_{30\%}$	0,65
$DHT_{40\%}$	12,03 %	$\sigma_{40\%}$	0,56
$DHT_{50\%}$	10,03 %	$\sigma_{50\%}$	0,47

Tabela 201 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 202 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,84 e 0,74.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 203 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,65.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 204 – MCDHT da fonte harmônica ASD para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,56 e 0,47.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.14 Outros

B.14.1 FP

Tabela 205 – Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual.

Média dos FP (Outros)	
Barra	FP
1 (650)	0,000 6
2 (632)	0,056 3
3 (633)	0,041 4
4 (671)	0,281 2
5 (675)	0,296 8
6 (680)	0,323 6

B.14.2 MDHT

Tabela 206 – MDHT da fonte outros para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	1,970299082	2,095963184	2,096039233	2,356572209	2,349145287	2,356583158
2 (632)	2,15609326	3,823526107	3,823654682	4,298985684	4,28542739	4,298995323
3 (633)	2,157553079	3,826107153	4,270732779	4,301985041	4,288428592	4,301995701
4 (671)	2,490659764	4,416872148	4,417118519	6,339224171	6,319231083	6,339240571
5 (675)	2,492245025	4,419686972	4,419938161	6,343262828	6,550556611	6,343280049
6 (680)	2,490664209	4,416882177	4,417133983	6,339239819	6,31924564	6,909941384

B.14.3 MCDHT

Tabela 207 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte outros do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	6,91 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,95
$DHT_{10\%}$	6,22 %	$\sigma_{10\%}$	0,86
$DHT_{20\%}$	5,53 %	$\sigma_{20\%}$	0,76
$DHT_{30\%}$	4,84 %	$\sigma_{30\%}$	0,67
$DHT_{40\%}$	4,15 %	$\sigma_{40\%}$	0,57
$DHT_{50\%}$	3,45 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 208 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 209 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,86, 0,76 e 0,67.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 210 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,57.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Tabela 211 – MCDHT da fonte harmônica outros para o sistema de 13 barras individual para o limiar de 0,48.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

B.15 Fluorescente

B.15.1 FP

Tabela 212 – Média dos FPs da fonte ASD para o sistema de 13 barras individual.

Média dos FP (Flu.)	
Barra	FP
1 (650)	0,000 4
2 (632)	0,050 1
3 (633)	0,034 8
4 (671)	0,300 5
5 (675)	0,311 8
6 (680)	0,302 5

B.15.2 MDHT

Tabela 213 – MDHT da fonte fluorescente para o sistema de 13 barras individual.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1 (650)	2,734367731	2,793876526	2,793220929	2,971765653	2,9617485	2,971769414
2 (632)	2,874028681	5,092423822	5,091217238	5,416982561	5,398718872	5,416998768
3 (633)	2,875195657	5,094479654	5,764554941	5,419443248	5,401162685	5,41945997
4 (671)	3,140850298	5,565533269	5,5645023	7,989877932	7,962921076	7,989893358
5 (675)	3,142156323	5,567833603	5,566814526	7,993177937	8,334252049	7,993200276
6 (680)	3,140854039	5,565542395	5,564502908	7,989892382	7,962933384	8,925579721

B.15.3 MCDHT

Tabela 214 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte fluorescente do sistema de 13 barras individual.

$DHT_{m\acute{a}x}$	8,93 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,93
$DHT_{10\%}$	8,03 %	$\sigma_{10\%}$	0,84
$DHT_{20\%}$	7,14 %	$\sigma_{20\%}$	0,74
$DHT_{30\%}$	6,25 %	$\sigma_{30\%}$	0,65
$DHT_{40\%}$	5,36 %	$\sigma_{40\%}$	0,56
$DHT_{50\%}$	4,46 %	$\sigma_{50\%}$	0,47

Tabela 215 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras individual para o limiar $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Tabela 216 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,84, 0,74 e 0,65.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1

Tabela 217 – MCDHT da fonte harmônica fluorescente para o sistema de 13 barras individual para os limiares de 0,56 e 0,47.

Barra	Localização da FH					
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1

Sistema de 13 Barras Industrial

Os FPs apresentados nesta seção não estão normalizados.

C.1 Frequência de 180 Hz

C.1.1 FP

Tabela 218 – FP da frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras industrial.

Frequência de 180 Hz	
Barra	FP
1	0,000 1
2	0,999 2
3	0,000 0
4	0,000 6
5	0,000 0

C.1.2 MDHT

Tabela 219 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras industrial.

Barra	Carga_1	Carga_2	Carga_3	Carga_4	Carga_5
1	5,369723	5,368638	5,36825	5,36599	5,360006
2	5,369722	5,385515	5,36825	5,365989	5,360005
3	5,369722	5,368638	5,38576	5,365989	5,360005
4	5,369721	5,368636	5,368248	5,403512	5,360003
5	5,369707	5,368622	5,368234	5,365973	5,385623

C.1.3 MCDHT

Tabela 220 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras industrial.

$DHT_{máx}$	5,43 %	$\sigma_{máx}$	0,02
$DHT_{10\%}$	4,89 %	$\sigma_{10\%}$	0,02
$DHT_{20\%}$	4,35 %	$\sigma_{20\%}$	0,02
$DHT_{30\%}$	3,80 %	$\sigma_{30\%}$	0,02
$DHT_{40\%}$	3,26 %	$\sigma_{40\%}$	0,01
$DHT_{50\%}$	2,72 %	$\sigma_{50\%}$	0,01

Tabela 221 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 13 barras industrial para os limiares $\sigma_{máx}$, 0,02, 0,02, 0,02, 0,01 e 0,01.

Barra	Localização da FH				
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

C.2 Frequência de 300 Hz

C.2.1 FP

Tabela 222 – FP da frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras industrial

Frequência de 300 Hz	
Barra	FP
1	0,000 1
2	0,999 1
3	0,000 0
4	0,000 7
5	0,000 0

C.2.2 MDHT

Tabela 223 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras industrial.

Barra	Carga_1	Carga_2	Carga_3	Carga_4	Carga_5
1	5,390306	5,389216	5,388827	5,386553	5,380516
2	5,390305	5,324918	5,388825	5,386552	5,380514
3	5,390304	5,389214	5,38312	5,386551	5,380514
4	5,390298	5,389208	5,388819	5,377277	5,380508
5	5,390254	5,389164	5,388775	5,386501	5,372703

C.2.3 MCDHT

Tabela 224 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 300 Hz do sistema de 13 barras industrial.

$DHT_{máx}$	5,39 %	$\sigma_{máx}$	0,97
$DHT_{10\%}$	4,85 %	$\sigma_{10\%}$	0,87
$DHT_{20\%}$	4,31 %	$\sigma_{20\%}$	0,77
$DHT_{30\%}$	3,77 %	$\sigma_{30\%}$	0,68
$DHT_{40\%}$	3,23 %	$\sigma_{40\%}$	0,58
$DHT_{50\%}$	2,70 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Tabela 225 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 13 barras industrial para os limiares $\sigma_{máx}$, 0,87, 0,77, 0,68, 0,58 e 0,48.

Barra	Localização da FH				
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

C.3 Frequência de 420 Hz

C.3.1 FP

Tabela 226 – FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras industrial.

Frequência de 420 Hz	
Barra	FP
1	0,000 1
2	0,999 1
3	0,000 0
4	0,000 8
5	0,000 0

C.3.2 MDHT

Tabela 227 – MDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras industrial.

Barra	Carga_1	Carga_2	Carga_3	Carga_4	Carga_5
1	5,285703	5,284632	5,28425	5,282014	5,276049
2	5,2857	5,092531	5,284247	5,282011	5,276046
3	5,285699	5,284628	5,242272	5,28201	5,276045
4	5,285687	5,284616	5,284234	5,199223	5,276033
5	5,285598	5,284528	5,284146	5,28191	5,215953

C.3.3 MCDHT

Tabela 228 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 13 barras industrial.

$DHT_{máx}$	5,29 %	$\sigma_{máx}$	0,89
$DHT_{10\%}$	4,76 %	$\sigma_{10\%}$	0,80
$DHT_{20\%}$	4,23 %	$\sigma_{20\%}$	0,71
$DHT_{30\%}$	3,70 %	$\sigma_{30\%}$	0,62
$DHT_{40\%}$	3,17 %	$\sigma_{40\%}$	0,53
$DHT_{50\%}$	2,64 %	$\sigma_{50\%}$	0,45

Tabela 229 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 13 barras industrial para os limiares 0,80, 0,71, 0,62, 0,53 e 0,45.

Barra	Localização da FH				
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

C.4 Fonte Harmônica 2

C.4.1 FP

Tabela 230 – Média dos FPs da fonte harmônica (2) para o sistema de 13 barras industrial.

Média dos FP (FH. 2)	
Barra	FP
1	0,000 1
2	0,908 2
3	0,000 0
4	0,000 8
5	0,000 0

C.4.2 MDHT

Tabela 231 – MDHT da fonte harmônica (2) para o sistema de 13 barras industrial.

Barra	Carga_1	Carga_2	Carga_3	Carga_4	Carga_5
1	4,971422	4,970416	4,970056	4,967956	4,96236
2	4,97142	4,830845	4,970054	4,967953	4,962358
3	4,97142	4,970413	4,941263	4,967953	4,962357
4	4,97141	4,970404	4,970044	4,912465	4,962348
5	4,971341	4,970335	4,969976	4,967875	4,921495

C.4.3 MCDHT

Tabela 232 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a fonte harmônica (2) do sistema de 13 barras industrial.

$DHT_{m\acute{a}x}$	4,97 %	$\sigma_{m\acute{a}x}$	0,90
$DHT_{10\%}$	4,47 %	$\sigma_{10\%}$	0,81
$DHT_{20\%}$	3,98 %	$\sigma_{20\%}$	0,72
$DHT_{30\%}$	3,48 %	$\sigma_{30\%}$	0,63
$DHT_{40\%}$	2,98 %	$\sigma_{40\%}$	0,54
$DHT_{50\%}$	2,49 %	$\sigma_{50\%}$	0,45

Tabela 233 – MCDHT da fonte harmônica (2) para o sistema de 13 barras industrial para os limiares $\sigma_{m\acute{a}x}$, 0,81, 0,72, 0,63, 0,54 e 0,45.

Barra	Localização da FH				
	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1

Sistema de 34 Barras

Como neste sistema considerou-se barras fictícias para a alocação das cargas distribuídas e estas foram consideradas como barras na matriz de admitância do sistema, consequentemente apresentaram FPs respectivos. Porém, quando alocada a fonte harmônica no ATP, estas barras não foram consideradas pois na prática elas não existiam. Devido a isto houve-se a necessidade de criar uma nova numeração para as barras. Uma numeração para as barras quando apresentados os FPs e outra para a MCDHT. Estas descritas na Tabela 234.

Tabela 234 – Numeração das barras do 34 barras quando se leva em consideração o FP e quando se leva a MCDHT.

Numeração das Barras			
Numeração do FP	Numeração da MCDHT	Numeração do FP	Numeração da MCDHT
1	1	15	11
2	2	16	Barra Fictícia
3	Barra Fictícia	17	12
4	3	18	Barra Fictícia
5	4	19	13
6	5	20	Barra Fictícia
7	6	21	14
8	7	22	15
9	Barra Fictícia	23	16
10	8	24	17
11	Barra Fictícia	25	Barra Fictícia
12	9	26	18
13	Barra Fictícia	27	Barra Fictícia
14	10	28	19

Os FPs apresentados nesta seção não estão normalizados.

Como é possível verificar na Seção 5.5.2. a Figura 63 desta nova numeração. Contudo neste apêndice será apresentado os dados da maneira como foram obtidos para a análise.

D.1 Frequência de 180 Hz

D.1.1 FP

Tabela 235 – FP da frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 180 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,0043	15	0,0498
2	0,0047	16	0,0506
3	0,0048	17	0,0528
4	0,0049	18	0,0529
5	0,0104	19	0,0532
6	0,0196	20	0,0532
7	0,0287	21	0,0287
8	0,0288	22	0,0498
9	0,0305	23	0,0388
10	0,0321	24	0,0513
11	0,0323	25	0,0521
12	0,0324	26	0,0530
13	0,0355	27	0,0531
14	0,0386	28	0,0532

D.1.2 MDHT

D.1.3 MCDHT

Tabela 237 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 180 Hz do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	23,68 %	$\sigma_{máx}$	1,00
$DHT_{10\%}$	21,31 %	$\sigma_{10\%}$	0,90
$DHT_{20\%}$	18,94 %	$\sigma_{20\%}$	0,80
$DHT_{30\%}$	16,58 %	$\sigma_{30\%}$	0,70
$DHT_{40\%}$	14,21 %	$\sigma_{40\%}$	0,60
$DHT_{50\%}$	11,21 %	$\sigma_{50\%}$	0,50

Figura 77 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$.

Figura 78 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,90.

Figura 79 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,80.

Figura 80 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,70.

Figura 81 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,60.

Figura 82 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 180 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,50.

D.2 Frequência de 298 Hz

D.2.1 FP

Tabela 238 – FP da frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 298 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,0038	15	0,0513
2	0,0041	16	0,0524
3	0,0042	17	0,0562
4	0,0044	18	0,0562
5	0,0094	19	0,0562
6	0,0176	20	0,0562
7	0,0259	21	0,0259
8	0,0260	22	0,0513
9	0,0276	23	0,0368
10	0,0292	24	0,0535
11	0,0294	25	0,0548
12	0,0295	26	0,0562
13	0,0330	27	0,0562
14	0,0366	28	0,0562

D.2.2 MDHT

D.2.3 MCDHT

Tabela 240 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 298 Hz do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	34,77 %	$\sigma_{máx}$	0,99
$DHT_{10\%}$	31,29 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	27,82 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	24,34 %	$\sigma_{30\%}$	0,70
$DHT_{40\%}$	20,86 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	17,39 %	$\sigma_{50\%}$	0,49

Figura 83 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$.

Figura 84 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,89.

Figura 85 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,70.

Figura 86 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 298 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,59.

Figura 87 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,49.

D.3 Frequência de 300 Hz

D.3.1 FP

Tabela 241 – FP da frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 300 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,0038	15	0,0513
2	0,0041	16	0,0524
3	0,0042	17	0,0563
4	0,0043	18	0,0563
5	0,0094	19	0,0562
6	0,0176	20	0,0562
7	0,0258	21	0,0258
8	0,0259	22	0,0513
9	0,0275	23	0,0368
10	0,0292	24	0,0536
11	0,0293	25	0,0549
12	0,0295	26	0,0562
13	0,0329	27	0,0562
14	0,0366	28	0,0562

D.3.2 MDHT

D.3.3 MCDHT

Tabela 243 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 300 Hz do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	34,89 %	$\sigma_{máx}$	0,99
$DHT_{10\%}$	31,37 %	$\sigma_{10\%}$	0,89
$DHT_{20\%}$	27,89 %	$\sigma_{20\%}$	0,79
$DHT_{30\%}$	24,40 %	$\sigma_{30\%}$	0,70
$DHT_{40\%}$	20,92 %	$\sigma_{40\%}$	0,59
$DHT_{50\%}$	17,43 %	$\sigma_{50\%}$	0,49

Figura 88 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$.

Figura 89 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,89.

Figura 90 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,79.

Figura 91 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,70.

Figura 92 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,59.

Figura 93 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 300 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,49.

D.4 Frequência de 420 Hz

D.4.1 FP

Tabela 244 – FP da frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 420 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,0029	15	0,0537
2	0,0031	16	0,0554
3	0,0032	17	0,0619
4	0,0033	18	0,0617
5	0,0074	19	0,0611
6	0,0142	20	0,0611
7	0,0213	21	0,0213
8	0,0213	22	0,0537
9	0,0229	23	0,0336
10	0,0246	24	0,0572
11	0,0247	25	0,0595
12	0,0249	26	0,0615
13	0,0289	27	0,0613
14	0,0334	28	0,0611

D.4.2 MDHT

D.4.3 MCDHT

Tabela 246 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 420 Hz do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	42,90 %	$\sigma_{máx}$	0,96
$DHT_{10\%}$	38,61 %	$\sigma_{10\%}$	0,86
$DHT_{20\%}$	34,32 %	$\sigma_{20\%}$	0,77
$DHT_{30\%}$	30,03 %	$\sigma_{30\%}$	0,67
$DHT_{40\%}$	25,74 %	$\sigma_{40\%}$	0,58
$DHT_{50\%}$	21,45 %	$\sigma_{50\%}$	0,48

Figura 94 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$.

Figura 95 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,86.

Figura 96 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,77.

Figura 97 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,67.

Figura 98 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,58.

Figura 99 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 420 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,48.

D.5 Frequência de 1.905 Hz

D.5.1 FP

Tabela 247 – FP da frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 1905 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,0484	15	0,0006
2	0,0523	16	0,0002
3	0,0536	17	0,0005
4	0,0549	18	0,0005
5	0,0957	19	0,0005
6	0,1047	20	0,0005
7	0,0763	21	0,0762
8	0,0758	22	0,0006
9	0,0687	23	0,0302
10	0,0613	24	0,0000
11	0,0607	25	0,0001
12	0,0601	26	0,0005
13	0,0451	27	0,0005
14	0,0309	28	0,0005

D.5.2 MDHT

D.5.3 MCDHT

Tabela 249 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 1905 Hz do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	72,37 %	$\sigma_{máx}$	0,70
$DHT_{10\%}$	65,13 %	$\sigma_{10\%}$	0,63
$DHT_{20\%}$	57,90 %	$\sigma_{20\%}$	0,56
$DHT_{30\%}$	50,66 %	$\sigma_{30\%}$	0,49
$DHT_{40\%}$	43,42 %	$\sigma_{40\%}$	0,42
$DHT_{50\%}$	36,19 %	$\sigma_{50\%}$	0,35

Figura 100 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$.

Figura 101 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,63.

Figura 102 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,56.

Figura 103 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,49.

Figura 104 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,42.

Figura 105 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 1.905 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,35.

D.6 Frequência de 4.193 Hz

D.6.1 FP

Tabela 250 – FP da frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 4.193 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,0552	15	0,0095
2	0,0593	16	0,0054
3	0,0606	17	0,0001
4	0,0618	18	0,0001
5	0,0447	19	0,0001
6	0,0004	20	0,0001
7	0,0501	21	0,0502
8	0,0509	22	0,0095
9	0,0633	23	0,0820
10	0,0740	24	0,0024
11	0,0747	25	0,0004
12	0,0755	26	0,0001
13	0,0866	27	0,0001
14	0,0826	28	0,0001

D.6.2 MDHT

D.6.3 MCDHT

Tabela 252 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 4.193 Hz do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	74,53 %	$\sigma_{máx}$	0,39
$DHT_{10\%}$	67,08 %	$\sigma_{10\%}$	0,35
$DHT_{20\%}$	59,62 %	$\sigma_{20\%}$	0,31
$DHT_{30\%}$	52,17 %	$\sigma_{30\%}$	0,27
$DHT_{40\%}$	44,72 %	$\sigma_{40\%}$	0,24
$DHT_{50\%}$	37,27 %	$\sigma_{50\%}$	0,20

Figura 106 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$

Figura 107 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,35.

Figura 108 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 4.193 Hz para o sistema de 34 barras para os limiares 0,31, 0,27, 0,24 e 0,20.

D.7 Frequência de 6.501 Hz

D.7.1 FP

Tabela 253 – FP da frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras.

Frequência de 6.501 Hz			
Barra	FP	Barra	FP
1	0,1121	15	0,0285
2	0,1194	16	0,0170
3	0,1212	17	0,0001
4	0,1225	18	0,0001
5	0,0120	19	0,0001
6	0,0509	20	0,0001
7	0,0724	21	0,0724
8	0,0707	22	0,0285
9	0,0429	23	0,0345
10	0,0189	24	0,0082
11	0,0172	25	0,0018
12	0,0156	26	0,0001
13	0,0010	27	0,0001
14	0,0319	28	0,0001

D.7.2 MDHT

D.7.3 MCDHT

Tabela 255 – Distorção harmônica total da tensão e limiares novos obtidos para a frequência de 6.501 do sistema de 34 barras.

$DHT_{máx}$	97,34 %	$\sigma_{máx}$	0,33
$DHT_{10\%}$	87,61 %	$\sigma_{10\%}$	0,30
$DHT_{20\%}$	77,87 %	$\sigma_{20\%}$	0,26
$DHT_{30\%}$	68,14 %	$\sigma_{30\%}$	0,23
$DHT_{40\%}$	58,40 %	$\sigma_{40\%}$	0,20
$DHT_{50\%}$	48,67 %	$\sigma_{50\%}$	0,17

Figura 109 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar $\sigma_{máx}$

Figura 110 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,30.

Figura 111 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,26.

Figura 112 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,23.

Figura 113 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,20.

Figura 114 – MCDHT da fonte harmônica (1) de frequência de 6.501 Hz para o sistema de 34 barras para o limiar 0,17.